



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV PROCESNÍHO INŽENÝRSTVÍ

INSTITUTE OF PROCESS ENGINEERING

VÝPOČET POTRUBNÍ TRASY PAROVODU

CALCULATION OF STEAM PIPELINE

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Jan Majer

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Richard Nekvasil, Ph.D.

BRNO 2016

Zadání diplomové práce

Ústav: Ústav procesního inženýrství
Student: **Bc. Jan Majer**
Studijní program: Strojní inženýrství
Studijní obor: Procesní inženýrství
Vedoucí práce: **Ing. Richard Nekvasil, Ph.D.**
Akademický rok: 2015/16

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

Výpočet potrubní trasy parovodu

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Cílem diplomové práce bude provedení pevnostního výpočtu potrubní trasy parovodu, kdy bude nutné vyřešit způsob jeho uložení, aby potrubí vyhovovalo požadavkům normy EN 13480.

Cíle diplomové práce:

1. Seznámení s řešenou problematikou
2. Rozbor řešeného problému
3. Návrh řešení potrubní trasy
4. Pevnostní analýza trasy
5. Porovnání výsledků, volba vhodné varianty

Seznam literatury:

Schneider P (1999): Základy konstruování procesních zařízení, PC-DIR Real, s.r.o., Brno
Křupka, V (1967): Výpočet válcových tenkostěnných kovových nádob a potrubí, SNTL, Praha
ČSN EN 13480-3 (2003): Kovová průmyslová potrubí, část 3 - Konstrukce a výpočet, SNI, Praha
Megson, T. H. G. (2000): Structural and Stress Analysis, Butterworth-Heinemann, Oxford

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2015/16

V Brně, dne

L. S.

prof. Ing. Petr Stehlík, CSc., dr. h. c.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan fakulty

ABSTRAKT

Práce objasňuje problematiku návrhového a kontrolního výpočtu parovodní potrubní trasy. K provedení analýzy jsou využity dva výpočtové programy – AutoPIPE a Ansys. V programu AutoPIPE je u potrubní trasy řešena problematika vhodného uložení a teplotní dilatace. Výsledky pevnostní analýzy z obou programů jsou vyhodnoceny dle normy ČSN EN 13480.

Klíčová slova

pevnostní výpočet, potrubí, parovod, AutoPIPE, Ansys

ABSTRACT

This thesis describes issues related to design and structural analysis of steam pipeline. Analysis are done by using two different software program – AutoPIPE and Ansys. Issues related to pipeline support system and thermal expansion are solved by using AutoPIPE. Structural analysis results are evaluated in accordance with ČSN EN 13 480 code.

Keywords

structural analysis, pipeline, steam pipeline, AutoPIPE, Ansys

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

MAJER, Jan. *Výpočet potrubní trasy parovodu*. Brno 2016. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav procesního inženýrství. 59 s. 4 přílohy na CD. Vedoucí práce Ing. Richard Nekvasil, Ph.D.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma **Výpočet potrubní trasy parovodu** vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených na seznamu, který tvoří přílohu této práce.

Datum

Bc. Jan Majer

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji tímto panu Ing. Richardovi Nekvasilovi, Ph.D. za cenné připomínky a rady při vypracování diplomové práce.

OBSAH

POUŽITÉ SYMBOLY A ZKRATKY	7
ÚVOD.....	8
1 Úvod do řešené problematiky	9
1.1 Části potrubních sítí	9
1.1.1 Trubky	9
1.1.2 Tvarovky, ohyby a kolena	10
1.1.3 Potrubní armatury	10
1.1.4 Kompenzační prvky	11
1.2 Spoje trubek	11
1.3 Izolace.....	13
1.4 Korozní přídavek.....	13
1.5 Uložení potrubí	14
1.5.1 Rozteč uložení.....	15
1.5.2 Druhy uložení	17
1.6 Norma ČSN EN 13 480.....	18
2 Úvod do pevnostního výpočtu.....	19
2.1 Teplotní roztažnost.....	19
2.2 Specifika návrhu parovodu	20
2.2.1 Spádování a odvodnění	20
2.3 O programu AutoPIPE	20
2.4 O programu Ansys	21
3 Rozbor řešeného problému	22
3.1 Model potrubní sítě	22
3.2 Okrajové podmínky.....	23
4 Pevnostní výpočet.....	24
4.1 Pevnostní výpočet pomocí programu AutoPIPE	24
4.1.1 Rozteč uložení.....	24
4.1.2 Kompenzátory.....	26
4.1.3 Volba rozměrů ohybového kompenzátoru	27
4.1.4 Posuvy hrdel	29
4.1.5 Kontrola průhybu potrubí.....	31
4.1.6 Pevnostní výpočet potrubní trasy.....	34
4.2 Pevnostní výpočet pomocí programu Ansys	36
4.2.1 Kritická místa pro kontrolu v programu Ansys	36
4.2.2 Kategorizace napětí.....	38

4.2.3	Dovolené namáhání.....	40
4.2.4	Kritické místo – redukce	40
4.2.5	Kritické místo – hrdlo odvodu kondenzátu	48
4.2.6	Kritické místo – hrdlo odběrového místa	51
5	Zhodnocení získaných výsledků	54
ZÁVĚR.....		55
SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ		56
SEZNAM OBRÁZKŮ A TABULEK.....		57
	Obrázky.....	57
	Tabulky	58
SEZNAM PŘÍLOH		59

POUŽITÉ SYMBOLY A ZKRATKY

symbol	význam	jednotka
$[\sigma]$	dovolené napětí	MPa
Δl	prodloužení trubky	mm
Δl_{\max}	maximální prodloužení trubky	mm
2R	charakteristický rozměr kompenzátoru	mm
DN	jmenovitý průměr	mm
DN	vnější průměr trubky	mm
f	dovolené namáhání	MPa
L_A	vzdálenost uložení od kolena	mm
L_B	vzdálenost uložení od kolena	mm
L_S	rozteč uložení	mm
R_e	mez kluzu v tahu	MPa
$R_{eH\ t}$	horní mez kluzu při výpočtové teplotě	MPa
R_m	mez pevnosti v tahu	MPa
$R_{p0.2\ t}$	smluvní mez kluzu při výpočtové teplotě	MPa
σ	napětí	MPa
σ_b	prosté ohybové napětí od silového zatížení	MPa
σ_{bL}	místní ohybové napětí od silového a deformačního zatížení	MPa
σ_K	kompenzační napětí	MPa
σ_m	prosté membránové napětí od silového zatížení	MPa
σ_{mL}	místní membránové napětí od silového zatížení	MPa
σ_T	základní teplotní napětí	MPa
σ_{TL}	teplotní lokální napětí	MPa
zkratka	význam	
HMH	hypotéza Huber, Mises, Hencky	
MKP	metoda konečných prvků	

ÚVOD

Potrubní systémy představují jeden z nejrozšířenějších způsobů přenosu médií pro celou škálu průmyslových odvětví. Ve vyspělé společnosti je možné na potrubí narazit prakticky kamkoliv se pohneme.

Princip přenosu médií pomocí potrubí sahá do hluboké historie, kdy staří Číňané dopravovali vodu pomocí bambusových trubek. Od této doby učinila technologie potrubí velký pokrok a v dnešní době je pomocí potrubí možné dopravovat nejrůznější kapaliny, plyny ale i pevné látky.

Potrubí, jež má být začleněno do provozu, musí splňovat kritéria stanovená příslušnou normou. Tato kritéria mají za cíl zajistit, že potrubí vydrží předpokládané zatížení po stanovenou dobu, aniž by došlo k poškození. Potrubí analyzované v této práci je kontrolováno dle normy ČSN EN 13480. Cílem této práce je nejen provést napěťovou analýzu potrubí, ale také vhodně vyřešit uložení potrubní trasy a provést opatření pro redukci napětí vyvolaného teplotní dilatací.

1 ÚVOD DO ŘEŠENÉ PROBLEMATIKY

Pevnostní výpočet kombinuje znalosti a poznatky z různých odvětví procesní i konstrukční činnosti. V této kapitole jsou stručně uvedeny nezbytné základy související s řešením dané úlohy potrubní sítě.

1.1 ČÁSTI POTRUBNÍCH SÍTÍ

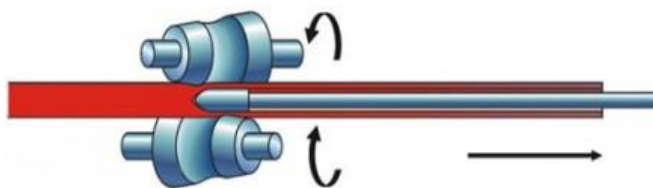
Potrubní síť, či trasa, je tvořena několika komponenty, z nichž naprostou většinu tvoří samotné trubky. Ty jsou doplněny tvarovkami, které umožňují změnu směru, spojení, či rozdělení, nebo také ukončení potrubní trasy. Potrubní síť často obsahuje také armatury nebo kompenzační prvky, v závislosti na účelu potrubní trasy a okolních podmínkách.

1.1.1 Trubky

Vlastní trubky tvoří významnou část potrubní sítě a mají velký vliv na vlastnosti a chování celé soustavy.

Bezešvé trubky

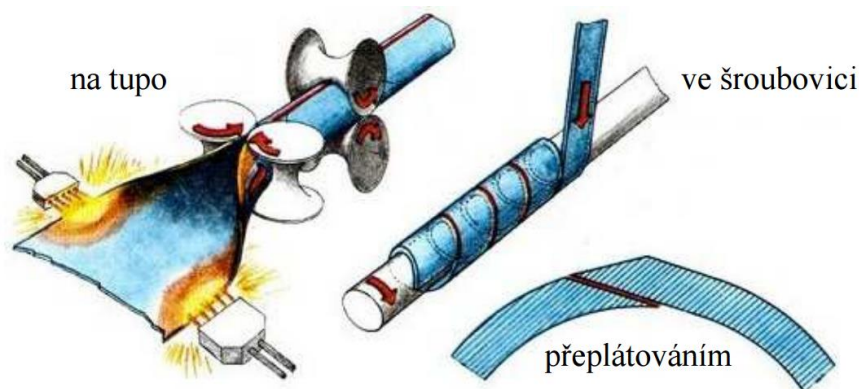
Výroba bezešvých trubek může probíhat několika zcela rozdílnými způsoby, a to válcováním, protahováním, tažením, či dopředným protlačováním. Nejčastěji používaný způsob výroby bezešvých trubek je válcování, jež lze provádět za studena, ale častěji se používá válcování za tepla, viz obr. 1.1. [1]



Obr. 1.1 Princip válcování za tepla [2]

Svařované (švové) trubky

Jelikož výroba bezešvých trubek je poměrně nákladná, pokud to daná situace dovolí, je možné zvolit jako levnější variantu svařované trubky. Ty se vyrábějí svařováním pásové oceli. Pláty je možné svařit na tupo, ve šroubovici nebo překlátováním, viz obr. 1.2. Použití těchto trubek ovšem není v některých případech možné. [3]



Obr. 1.2 Druhy svařovaných trubek [3]

1.1.2 Tvarovky, ohyby a kolena

Tvarovky, ohyby a kolena jsou prvky potrubí, jež umožňují měnit tvar a směr potrubní trasy. Díky tvarovkám je také možné z jednoduché potrubní trasy vytvořit rozsáhlou a rozvětvenou potrubní síť.

Ohyby a kolena existují buď jako hotové výlisky, případně i odlitky, nebo je možné je zhotovit ohýbáním trubky za tepla, či za studena. S ohýbáním trubky jsou však spojené komplikace v podobě zeslabení stěny na vnějším poloměru a zvrásnění stěny na vnitřním poloměru.

Tvarovky lze použít k rozdělení či spojení potrubních tras, nejčastěji pomocí tvarovky typu T nebo Y. Pomocí redukce je možné také změnit průřez potrubí a umožnit tak spojení s prvkem s odlišným průřezem. Mezi tvarovky patří také záslepka, kterou lze potrubní trasu ukončit. [4]

1.1.3 Potrubní armatury

V literatuře se vyskytuje hned několik způsobů třídění armatur. Jednotlivé třídy armatur se pak ještě liší způsobem ovládání, které může být například ruční, ruční s převodovkou, elektrické (elektromotorem), pneumatické, hydraulické a další. Materiály armatur jsou vybírány s ohledem na použité médium, se kterým budou v kontaktu. Třídění uvedené níže nejvíce odpovídá třídění armatur z pohledu projektanta potrubního systému. Armatury se tedy dělí na následující:

Armatury k hrazení toku tekutiny

Někdy je tato kategorie označována také jako armatury uzavírací. Do této kategorie patří především uzavírací ventily, šoupátka, klapky, kohouty, zpětné ventily a další. Primárním účelem těchto armatur je dle potřeby zahradit průtočný průřez potrubí. Měly by být užívány pouze ve dvou funkčních polohách: otevřeno a uzavřeno. Nicméně v praxi jsou některé typy uzavíracích armatur užívány také k hrubé regulaci. Těsnost armatur určují příslušné normy. Důležitým aspektem těchto armatur je také "jistota uzavření". Často bývají použity na místech, kde je v případě potřeby nutné je dokonale uzavřít. [4]

Armatury k řízení průtoku tekutiny

Armaturám v této kategorii se také říká regulační armatury, slouží k regulaci průtoku média. Oproti uzavíracím armaturám obecně nejsou považovány za těsné, neslouží k uzavírání průtoku. Patří sem například ventily, šoupátka a klapky. [4]

Armatury k řízení tlaku tekutiny

Mezi armatury pro řízení tlaku tekutiny spadají například pojistné ventily. Ty chrání potrubí proti nepřipustnému zvýšení tlaku, jež by mohlo potrubní systém ohrozit. Často je pojistný ventil používán jako "prvek poslední záchrany", v případě že selžou všechna ostatní opatření. Konstrukce pojistných ventilů bývá co nejjednodušší, aby se minimalizovalo riziko mechanického selhání.

Společně s pojistnými ventily do této kategorie můžeme také zařadit redukční ventily. Tyto ventily v podstatě regulují výstupní tlak tím, že je otevírán, nebo uzavírán průtočný průřez tak, aby bylo dosaženo požadovaného výstupního tlaku. [4]

Ostatní příslušenství

Mezi často používané příslušenství patří filtry a odvaděče kondenzátu. Filtry nabízí širokou možnost separace a dělení látek v proudícím médiu. Odvaděče kondenzátu, jak už ze

samotného názvu vyplývá, slouží především k odvedení nežádoucí kondenzované páry z parovodního potrubí. [4]

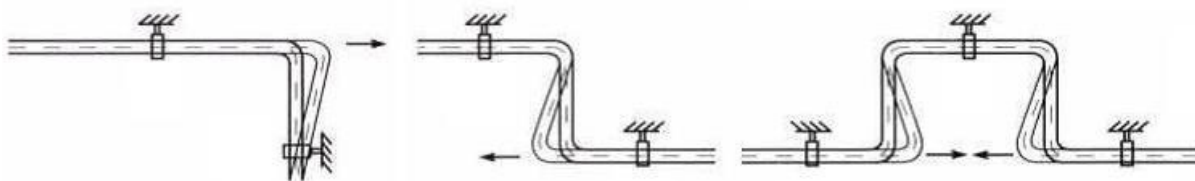
1.1.4 Kompenzační prvky

Kompenzační prvky neboli kompenzátory slouží ke kompenzaci teplotních dilatací v potrubí. Teplotní dilataci se podrobněji zabývá kapitola 2.1.

Ohybové kompenzační prvky

Tyto kompenzační prvky jsou tvořeny vlastními ohyby potrubí, ať už přirozenými, či záměrně vytvořenými. Ohybové kompenzátory bývají často nejvhodnější a zároveň nejlevnější variantou kompenzace teplotní dilatace. Nevýhodou jsou prostorové nároky těchto kompenzátorů.

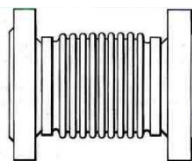
Tvarů, jež se používají pro tvarovou kompenzaci, je široká škála. Vybrané tvary jsou znázorněny na obr. 1.3. Kromě těchto vyobrazených tvarů se také často používá lyrový kompenzátor nebo dilatační smyčka.



Obr. 1.3 Tvary ohybových kompenzačních prvků [5]

Osové kompenzační prvky

Pokud nedostatek místa v okolí potrubní trasy nebo jiná příčina nedovolí použití ohybových kompenzačních prvků, je možné také využít osové kompenzační prvky. Ty umožňují kompenzovat teplotní dilataci potrubí, aniž by bylo nutné vychylovat danou trasu. Kompenzátory jsou však dražší a také u nich hrozí riziko mechanického selhání. Mezi základní typy osových kompenzátorů patří kompenzátor ucpávkový nebo vlnovcový, který je zobrazen na obr. 1.4. [4]



Obr. 1.4 Osový kompenzační prvek [4]

1.2 SPOJE TRUBEK

Potrubní spoje se, stejně jako i ostatní spoje, dělí na rozebíratelné a nerozebíratelné. Typ spoje je vždy volen s ohledem na dané podmínky. Rozebíratelné spoje lze často rozpojovat a spojovat, nicméně jsou náchylnější k selhání a vyžadují častější údržbu. Proto do míst, kde je špatný přístup pro obsluhu, je lepší zvolit nerozebíratelný spoj.

Rozebíratelné spoje trubek

Nejpoužívanějším typem potrubního rozebíratelného spoje je přírubový spoj. Přírubový spoj je relativně jednoduchý, spolehlivý a má širokou škálu normalizovaných rozměrů. Skládá se ze dvou přírub, spojovacích šroubů a matic a těsnění. Propojení příruby s potrubím může být provedeno za pomoci svaru nebo závitu, nebo může být provedení volné (otočné). [4], [5]

U přírubových spojů trubek je třeba zajistit těsnost spoje, k čemuž se používá těsnění. Smyslem těsnění je vyplnit nerovnosti materiálu přírub tak, aby nedocházelo k únikům média. Aby bylo vyplnění co nejtěsnější, za pomoci šroubů a matic se vyvine tlak na kontaktní plochy přírub a těsnění. Ze široké škály těsnění se vybírá vhodné těsnění dle pracovního tlaku a charakteristiky použitého média. [4]



Obr. 1.5 Přírubový spoj [6]

Do kategorie rozebíratelných spojů se řadí také strojírenská šroubení, násuvná hrdlová spojení, spojení vnější spojkou a další. [7], [6]

Nerozebíratelné spoje

Z řady nerozebíratelných spojů je nejčastěji možné se v praxi setkat se spojem svařovaným. Svařování může být použito pro spojení potrubí v mnoha různých formách, dle okolností se volí nejvhodnější způsob svařování. Kromě svařování se mezi nerozebíratelné spoje řadí také například spoje pájené, lepené a lisované. [7]



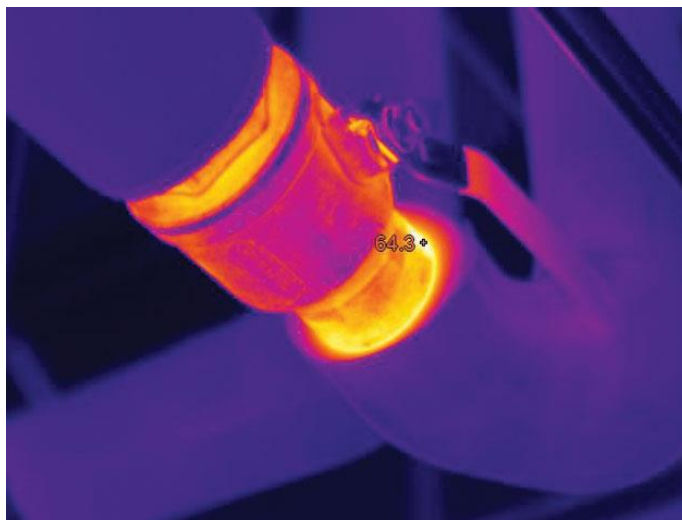
Obr. 1.6 Svařovaný spoj potrubí [8]

1.3 IZOLACE

U potrubí, ve kterých je teplota přepravovaného média jiná než teplota okolního prostředí, se objevuje potřeba - v některých případech i nutnost - potrubí tepelně izolovat a omezit tak ztráty tepla do okolí. Tepelné ztráty často zároveň představují i ekonomickou ztrátu, kdy je potřeba vyrobit - a tudíž i zaplatit - více tepla. Navíc v mnoha případech mohou ztráty tepla negativně ovlivnit vlastnosti přenášeného média, jako v případě kondenzace vody v parním potrubí nebo zamrzání média při nízkých teplotách okolí. Také má-li médium nižší teplotu než okolí, může se povrch potrubí orosit. [6]

Jako u většiny řešených problémů v dnešní době má v praxi hlavní slovo ekonomická stránka. Není třeba za každou cenu minimalizovat množství unikajícího tepla, pokud by to vyžadovalo nepřiměřené množství izolačního materiálu. Je třeba vhodně zhodnotit náklady vyplývající ze zateplení a vybrat ekonomicky nejlepší variantu. V této úvaze je třeba počítat s investičními náklady na pořízení a realizaci izolace a ceně tepla přenášeného médiem. Existují již předem vytvořené tabulky či programy, které na základě zadaných parametrů napomohou zvolit nejvhodnější variantu. Výsledkem této kalkulace nejčastěji bývá druh a tloušťka izolace.

Dříve často nebyla místa vyžadující přístup obsluhy (armatury, zařízení, atd.) opatřena izolací, dnes je tento problém vyřešen odnímatelnou izolací. Je rovněž možné využít předizolované potrubí a urychlit tak proces stavby. Pro detekci úniku tepla je také možno využít termovizní kameru, viz obr. 1.7. [6]



Obr. 1.7 Použití termovizní kamery pro odhalení úniku tepla [9]

Jako izolační materiál bývají použity materiály s nízkou tepelnou vodivostí a také malou hustotou. Často bývá využívána minerální vata, polystyren, polyuretan, skelná vata nebo různé izolační pěny. Účinnost izolace závisí na struktuře uzavřených vzduchových komůrek, jež izolační materiály obsahují. Je nutné, aby izolační materiál nenasákl vodou nebo se nepoškodil. Promáčená izolace několikanásobně zvětšuje tepelné ztráty. Povrch izolace proto bývá chráněn pláštěm nebo obalem, často ve formě kovového plechu. [10]

1.4 KOROZNÍ PŘÍDAVEK

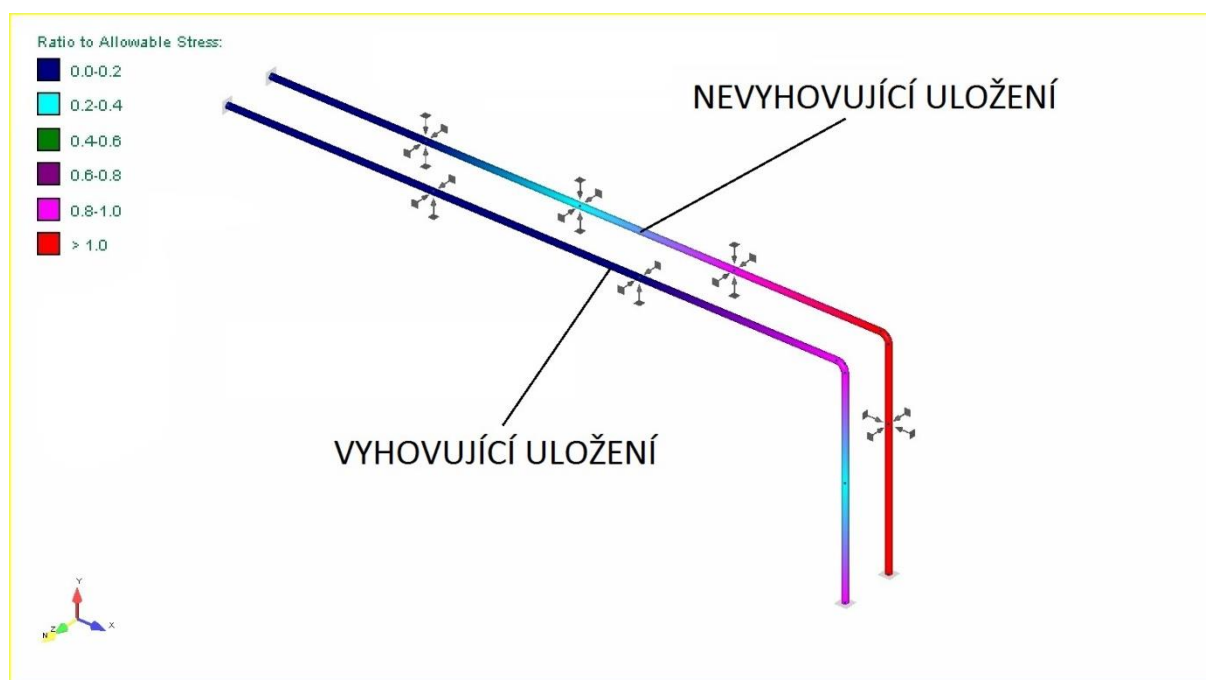
Korozní přídavek je přídavek k tloušťce stěny potrubí, který má za úkol kompenzovat úbytek materiálu způsobený korozí nebo erozí. Ke korozi může docházet uvnitř potrubí působením přepravovaného média nebo také na vnějším povrchu potrubí vlivem okolní atmosféry.

Úměrně očekávanému koroznímu úbytku na obou stranách povrchu je pak zvolen korozní přírůstek. K určení korozního přírůstku je potřeba brát v úvahu spoustu faktorů, kromě vlastností médií také geologickou polohu (klíma), náchylnost k zatékání dešťové vody a mnoho dalších. Pro agresivní látky je přírůstek vyšší, naopak můžeme-li korozi vyloučit (např. použitím korozivzdorných materiálů nebo ochraně proti korozi), nemusí být korozní přírůstek vůbec aplikován. [10]

1.5 ULOŽENÍ POTRUBÍ

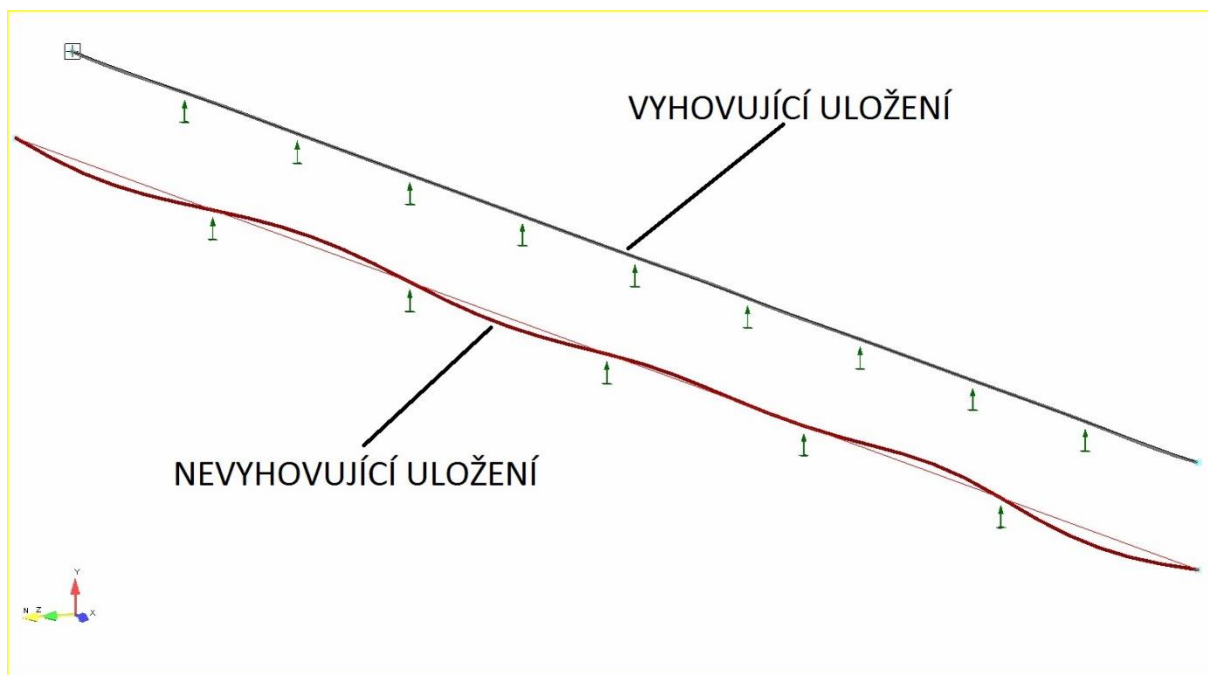
Pojmem uložení potrubí jsou v první řadě myšleny všechny sestavy a mechanické prvky (např. podpěry nebo závěsy), které spojují potrubí s podlahou nebo nosnou konstrukcí. Účelem správného uložení potrubí je zajistit, aby potrubí dodržovala předem zamýšlenou trajektorii, případně se řízeně deformovalo pro kompenzaci dilatací. Musí také zajistit, aby nebyla ovlivněna stabilita potrubí působením vnějších sil, rázy nebo chvěním. Smyslem uložení není pouze upevnit potrubí na daném místě, ale vhodnou kombinací různých druhů podpor zajistit, aby v potrubí nedocházelo k přílišnému pnutí či deformaci. [11]

Na obrázcích níže jsou příklady špatného uložení. Na obr. 1.8 je potrubí obsahující páru o teplotě 380 °C, přičemž teplota okolí je 20 °C. Z obrázku je patrné, že v jednom případě jsou nevhodně umístěny a zvoleny podpory, a přestože je jich použito více, než v případě vyhovujícího uložení, je to spíše na škodu a uložení brání pohybu potrubí způsobeného dilatací a vytváří tak nepřijatelné napětí.



Obr. 1.8 Příklad nevhodně zvoleného uložení

Na obr. 1.9 je znázorněn příklad špatně zvolené rozteče uložení. V případě nevyhovujícího uložení jsou podpory umístěny příliš daleko od sebe a vytváří tak nepřijatelné průhyby potrubí.



Obr. 1.9 Příklad nevhodně zvolené rozteče uložení

1.5.1 Rozteč uložení

Uložení potrubí od sebe musí mít určitou vzdálenost, která zajistí, aby nedocházelo k nežádoucím jevům. Stejně jako u ostatních aspektů projektování potrubí na druhé straně vah působí ekonomická stránka. Mít uložení příliš blízko u sebe navýší jejich celkový počet a zvýší investiční náklady. Na druhou stranu ale uložení nesmí být ani příliš vzdálené, v potrubí by totiž mohlo docházet k průhybům, s tím spojeným nedodržením spádu nebo také k přílišnému zatížení jednotlivých uložení.

V literatuře se také občas vyskytují "pravidla palce"¹ pro odhad rozteče uložení, jako například vzorec: [11]

$$L_S = 400 \times \sqrt{DN} \quad (1.1)$$

kde

L_S	rozteč uložení [mm]
DN	jmenovitý průměr potrubí [mm]

Další pravidlo palce najdeme v publikaci Pipe Stress Engineering [12], kde jsou doporučené rozteče uložení prezentovány ve formě tabulky - viz tab. 1.1.

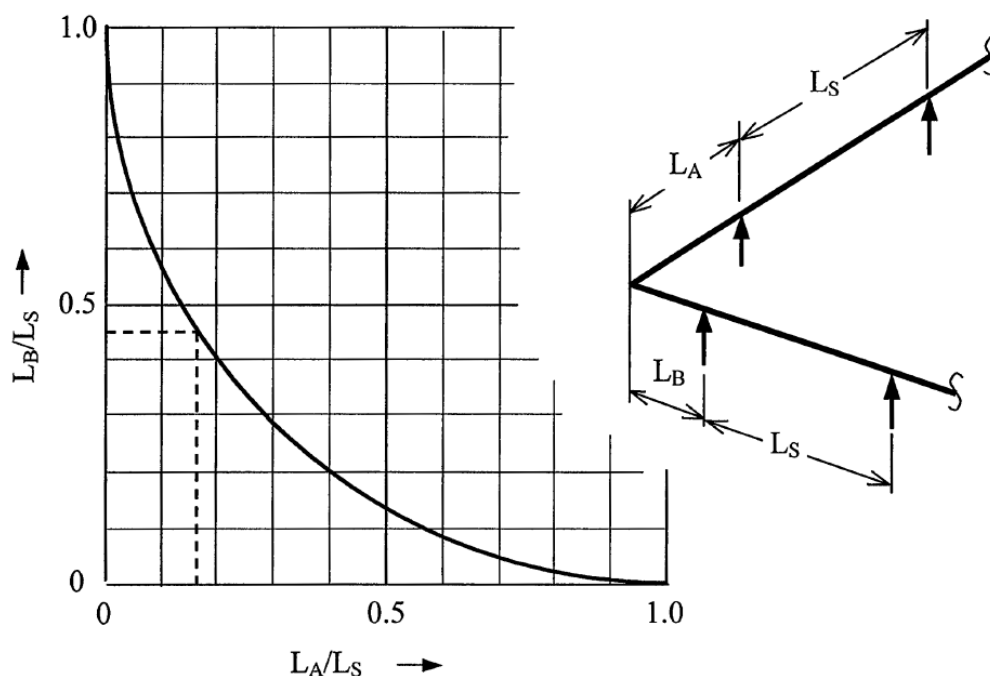
¹ Z anglického "rule of thumb", představuje zjednodušený odhad komplexnějšího problému.

DN [mm]	doporučená maximální rozteč, Ls [m]	
	kapalina	plyn
25	2.1	2.7
50	3	4
80	3.7	4.6
100	4.3	5.2
150	5.2	6.4
200	5.8	7.3
300	7	9.1
400	8.2	10.7
500	9.1	11.9
600	9.8	12.8

Tab. 1.1 Doporučené rozteče uložení [12]

Tato pravidla však platí pouze pro potrubí jednotného průměru bez jakéhokoliv dalšího zatížení, které představují různé armatury. Platí také pouze pro rovné úseky potrubí.

Pro nepodepřená kolena je pak možné aplikovat princip čtvrtkruhu, viz obr. 1.10. Jak je z obrázku patrné, pomocí vzdálenosti jedné podpory od kolena je možné dopočítat vzdálenost podpory druhé, např. pokud je vzdálenost $L_B = 0,45 \cdot L_S$, pak L_A by mělo být maximálně $0,16 \cdot L_S$. [12]



Obr. 1.10 Princip čtvrtkruhu [12]

1.5.2 Druhy uložení

Existuje nepřeberné množství druhů uložení, přičemž každé nabízí projektantovi různé způsoby uložení trasy potrubí. Některé jsou navrženy tak, aby zcela omezily pohyb potrubí, další pak zamezují pohybu nebo rotaci v určitých směrech. Liší se také způsobem upevnění i možnostmi nastavení určité vůle pohybu. Podle způsobu uchycení k nosné konstrukci pak rozlišujeme uložení na podpory a závěsy. Níže jsou uvedeny vybrané druhy uložení. [11]

Kluzná podpěra

Kluzná podpěra patří mezi nejčastěji používaná uložení, zachycuje vertikální síly potrubí a umožňuje libovolný pohyb v horizontálním směru. Kluzná podpěra může být modifikována na následující druhy uložení:

Kluzná podpěra nezdvižná - je doplněna o omezení posuvu v kladném vertikálním směru, zachovává volnost pohybu v horizontálním směru.

Kluzná podpěra s vedením - je doplněna o omezení posuvů v laterálním směru.

Kluzná podpěra se zarážkou - je doplněna o omezení posuvů v osovém vodorovném směru.

Pro snížení třecího odporu kluzných podpěr je možné použít speciální materiály s lepšími vlastnostmi, jako například teflon. [11]

Pevný bod

Pevný bod (neboli kotvení) je konstrukce, která omezuje posuv a natočení potrubí ve všech třech směrech. V každé potrubní větvi by měl být alespoň jeden pevný bod. [11]

Pevný závěs

Pevný závěs přenáší vertikální zatížení potrubí zavěšením pomocí tuhého táhla omezujícího svislý posuv dolů. Umožňuje seřizovat výšku potrubí při montáži. Pevný závěs musí umožňovat vychýlení od svislé osy o $\pm 4^\circ$. [11]

Pružinový závěs, konstantní závěs

Oba tyto závěsy přenáší vertikální zatížení potrubí zavěšením pomocí tuhého táhla spojeného s pružinovým blokem. Zatímco pružinový závěs má pružinový blok s lineární charakteristikou, konstantní závěs má pružinový blok s charakteristikou stálé síly, která se s pohybem pružiny nemění. [11]

Pružinová podpěra, konstantní podpěra

Tyto podpěry jsou ekvivalentem pružinového a konstantního závěsu, liší se v provedení uchycení. Podpěry přenáší vertikální zatížení pomocí patky pod potrubím. [11]

Tlumič rázů, omezovač kmitání

Tyto speciální druhy uložení slouží k omezení negativních vlivů tlumením rázů nebo kmitání, jež mohou být pro potrubní sestavu potenciálně velmi nebezpečné z hlediska pevnosti. [11]

1.6 NORMA ČSN EN 13 480

Pro charakteristiku normy ČSN EN 13 480 lze použít přímo definici ze samotné normy: "Tato evropská norma určuje požadavky pro průmyslové potrubní systémy a podpěry, včetně bezpečnostních systémů z kovových materiálů s ohledem na zajištění bezpečnosti provozu. Tato evropská norma platí pro kovové potrubí nad zemí, v kanálech nebo v zemi bez ohledu na tlak." [13]

Norma se skládá z osmi částí, jež jsou vzájemně související a neoddělitelné. Jednotlivé části normy jsou: [13]

- Část 1: Obecně
- Část 2: Materiály
- Část 3: Konstrukce a výpočet
- Část 4: Výroba a montáž
- Část 5: Zkoušení a kontrola
- Část 6: Doplnkové požadavky na podzemní potrubí
- Část 7: Návod na používání postupů posouzení shody
- Část 8: Doplnující požadavky pro potrubí z hliníku a hliníkových slitin

2 ÚVOD DO PEVNOSTNÍHO VÝPOČTU

Pevnostní výpočet tvoří jeden ze základních kamenů při navrhování či kontrole stávajících zařízení napříč celým průmyslovým odvětvím. Tyto výpočty slouží k analýze a prevenci nežádoucích stavů, jako jsou poruchy, havárie a další. Pro zajištění bezpečného provozu zařízení je třeba uvažovat veškeré možné vlivy, které mohou ovlivnit chování materiálu zařízení. Z oblasti chování materiálů jsou neustále získávány nové poznatky, jež jsou aplikovány do pevnostních výpočtů. Velkou motivací jsou možné finanční úspory, kterých lze dosáhnout, pokud se projektant vyhne zbytečnému předimenzování zařízení. Na druhou stranu je však vždy třeba brát v potaz následky případného selhání zařízení a zachovávat dostatečnou bezpečnost provozu zařízení.

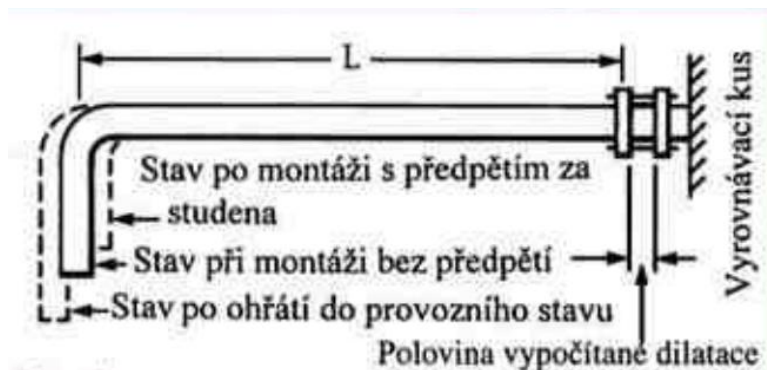
Pevnostní výpočty se dělí do dvou hlavních kategorií – kontrolní výpočty a návrhové výpočty. Cílem kontrolního výpočtu je potvrdit, že navržené zařízení pevnostně vyhovuje podmínkám stanoveným normou. Návrhové výpočty zahrnují pevnostní výpočet už do samotného návrhu zařízení a zařízení je tedy dopředu navrhováno tak, aby splnilo požadavky normy.

V současné době se pro pevnostní výpočty využívá velká spousta softwarových programů, které projektantovi mohou značně usnadnit vlastní provádění výpočtu. V této práci budou využity dva z těchto programů, a to konkrétně programy AutoPIPE a Ansys.

2.1 TEPLOTNÍ ROZTAŽNOST

Teplotní roztažnost je jev, kdy materiál mění své rozměry po přidání nebo odebrání tepla. Potrubní sestavy jsou obvykle montovány při teplotě okolního vzduchu. Při samotném provozu však potrubím často proudí médium o vysoké teplotě a své teplo předá i do potrubí. V důsledku tohoto ohřátí se potrubí začíná rozpínat v závislosti na tepelné roztažnosti materiálu a teplotě. Tomuto jevu se říká dilatace potrubí neboli teplotní roztažnost. [10]

Potrubní trasa musí být navržena tak, aby byla schopna vyrovnat teplotní dilatace jednotlivých úseků. Rozsah dilatací je možné omezit pomocí předpětí za studena. Při montáži se potrubí zkrátí a polovinu vypočítané předpokládané dilatace a po dotažení šroubů vznikne předpětí. Při provozní teplotě tak vzniká menší napětí, než kdyby nebylo použito předpětí za studena. V praxi se do potrubí vkládá mezikus o délce, která je rovna polovině předpokládané dilatace a po usazení a upevnění potrubí se tento mezikus odstraní a šrouby se přitáhnou tak, aby vzniklo požadované předpětí. Tento způsob však pohltí pouze část dilatačního prodloužení, v ostatních případech je třeba využít kompenzátor. [10]



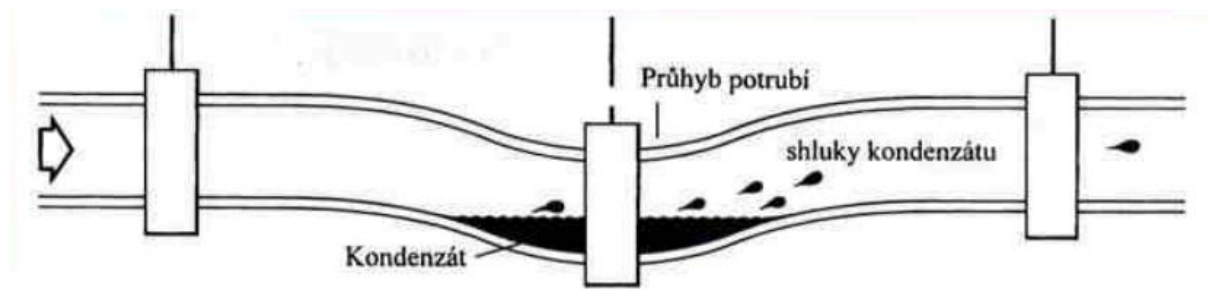
Obr. 2.1 Zhotovení předpětí za studena [10]

2.2 SPECIFIKA NÁVRHU PAROVODU

Pro návrh parovodu existuje řada pravidel a doporučení, která mají za úkol zajistit, aby se pára dostala na konec parovodu v dostatečné kvalitě a množství, aby byly minimální požadavky na údržbu a aby se předcházelo poškození částí parovodu. Několik bodů správného návrhu již bylo zmíněno v předchozích kapitolách (viz kapitoly 1.3, 1.4, 1.5 aj.).

2.2.1 Spádování a odvodnění

Jedním z důležitých prvků parovodu je spádování a odvodnění. Pára vycházející ze zdroje často obsahuje více vlhkosti, než se očekává. Navíc pára částečně kondenzuje kvůli tepelným ztrátám potrubí do okolí. Množství unikajícího tepla lze minimalizovat vhodným použitím izolace, k jisté minimální kondenzaci ale vždy dojde. Kondenzovaná pára pak vytváří kapičky na vnitřním povrchu potrubí a tyto kapičky se vlivem proudění páry shlukují do větších kapek nebo do filmu kondenzátu. Dostatečně velké kapky mohou být strhnuty a unášeny proudem páry. Výsledkem je pak mokrá pára na konci parovodu, v horším případě pak mohou tyto unášené kapky způsobit poškození potrubí či tvarovek, neboť kapička unášená parou (rychlost páry může být i 30 m/s nebo více) má značnou kinetickou energii. Obzvláště rizikový je tento jev, pokud dochází k průhybům potrubí, kde se kondenzát shromažďuje, a do proudu se utrhnávají celé shluky kapek, viz obr. 2.2. [10]



Obr. 2.2 Unášení kondenzátu z průhybu potrubí po přetržení závěsu potrubí [10]

Aby nedocházelo k výše zmíněným negativním jevům, je potřeba potrubí spádovat ve směru proudění a v nejnižích položených místech zajistit odvod kondenzátu.

2.3 O PROGRAMU AUTOPIPE

Program AutoPIPE byl vyvinut společností Bentley Systems, Inc. založené v roce 1984 v Pensylvánii ve Spojených státech amerických. Tato společnost je zaměřena na vývoj softwaru pro řešení návrhu, konstrukce a provozu infrastruktury. Od roku 2000 Bentley spolupracuje s iniciativou PED a v roce 2003 se program AutoPIPE stal jedním z prvních programů pro napěťovou analýzu, který podporoval potrubní normu EN 13480.

Program AutoPIPE je komerčně dostupný již od roku 1986. Vyhovuje přísným QA standardům, díky čemuž je jedním z mála výpočtových programů autorizovaných pro použití v oboru jaderné energetiky. Pomocí programu AutoPIPE je možné analyzovat potrubní systémy od malých po rozsáhlé projekty v oblasti energetiky, plynárenství, těžebního průmyslu, jaderné energetiky a mnoha dalších. Samotný program umožňuje vytvořit model, zatížit jej rozličnými druhy zatížení (teplotní, statické, dynamické), analyzovat a následně přehledně zobrazit získané výsledky. [14]

2.4 O PROGRAMU ANSYS

Program Ansys je v současnosti jeden z nejvíce rozšířených programů pro pevnostní výpočty. Vyznačuje se především velkou univerzálností při použití, stejně tak jako kvalitou a zpracovaností. Program Ansys pracuje na výpočtovém principu MKP, tedy metody konečných prvků. Kromě pevnostních výpočtů je možné pomocí programu Ansys analyzovat také vedení tepla nebo proudění kapalin.

Ansys pro analýzu 3D těles využívá tzv. meshování, tedy rozdělení modelu na vhodný počet uzlů, pro které program dopočítává požadované hodnoty. Platí, že čím jemnější síť (mesh) je vytvořena, tím jsou výsledky přesnější, nicméně analýza je náročnější na výpočtový čas.

Stejně jako v programu AutoPIPE, i v programu Ansys je možné vytvořit vlastní model, nebo importovat model vytvořený jiným programem.

Po dokončení výpočtů je možné v programu Ansys přehledně zobrazit výsledky, ať už v grafické formě, nebo vypsáním jednotlivých hodnot. [15]

3 ROZBOR ŘEŠENÉHO PROBLÉMU

Před samotným pevnostním výpočtem je nezbytné stanovit podmínky, za kterých bude vlastní výpočet probíhat. Do těchto podmínek lze zahrnout charakteristiku zkoumané potrubní trasy i okrajové podmínky.

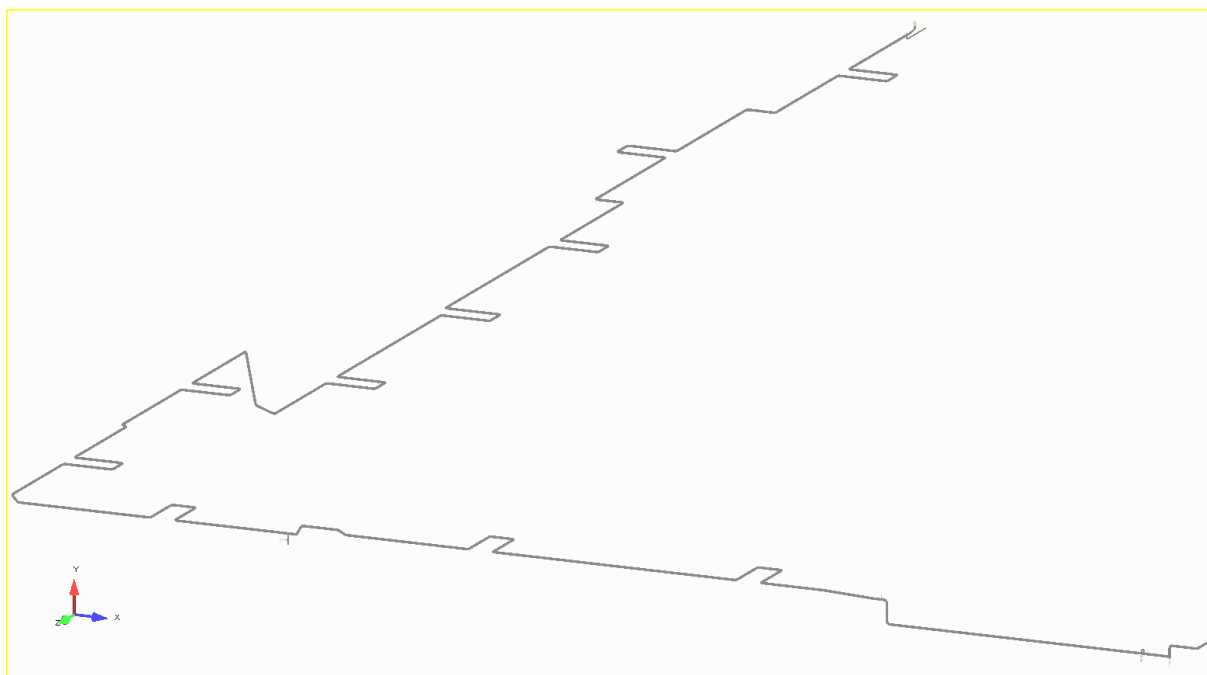
Bude posuzován vliv provozního zatížení, které v tomto případě představuje vnitřní přetlak, teplota média a vlastní tíha potrubí, na konstrukci potrubí a výsledek bude posouzen v souladu s normou ČSN EN 13480.

Kromě toho bude také úkolem zvolit vhodné uložení potrubní trasy a vyřešit nežádoucí napětí vyvolané teplotní dilatací, která vzniká při průtoku média o teplotě 380 °C. Jak by mělo vypadat správné uložení je popsáno v kapitole 1.5 a tyto poznatky budou aplikovány na zadaný model potrubní trasy. Dilatace budou řešeny v souladu s kapitolou 1.1.4 a 2.1 pomocí kompenzačních prvků vhodně umístěných tak, aby parovod vyhovoval podmínkám stanoveným normou.

3.1 MODEL POTRUBNÍ SÍTĚ

Výchozím podkladem pro tvorbu modelu potrubní sítě byl výkres izometrie opatřený popisky a rozměrovými kótami. Tato izometrie je součástí elektronické přílohy. Tento výkres byl vytvořen pouze jako pracovní verze a jedná se proto spíše o model v programu AutoCAD než o klasický výkres.

Pro parovod je nezbytné, aby bylo zachováno spádování, jak je popsáno v kapitole 2.2. V zadaném případě je parovodní potrubí umístěno na potrubním mostu, kde je zajištěno konstantní klesání 3 ‰. Vzhledem k tomu, že klesání je po celé délce parovodu neměnné, bylo při modelaci potrubí zanedbáno a potrubí je modelováno v rovině.



Obr. 3.1 Celkový náhled na model parovodního potrubí

Model na obr. 3.1 prezentuje podobu již po aplikovaných úpravách z kapitoly 4.1.

3.2 OKRAJOVÉ PODMÍNKY

Vstupní parametry pro výpočet jsou zadány formou tabulky – viz tab. 3.1

POTRUBNÍ LINIE				PRACOVNÍ PODMÍNKY		VÝPOČTOVÉ PODMÍNKY		KOROZNÍ PŘÍDAVEK [mm]	SKUPENSTVÍ PRAC. LÁTKY	IZOLACE		OTÁPĚNÍ	
Č.	LÁTKA	DN	POTRUB. TŘÍDA	TLAK [Bar]	TEPLOTA [°C]	TLAK [Bar]	TEPLOTA [°C]			TYP	TL. [mm]	TYP	TEPLOTA [°C]
001	STM	200/150	CIC	31.0-38.5	380	39.0	380	1	G	min. vlna	140	-	-

Tab. 3.1 Vstupní parametry pro výpočet

Materiál potrubí: 12021.1 (odpovídá St 35.8, 1.0305, 1.1122, L 245 NB)

Materiál potrubí patří do skupiny uhlíkových žárupevných ocelí. Předpokládá se provoz v podcreepové oblasti.

Zároveň je stanovena podmínka, že výsledné posuvy napojovacích hrdel nesmí přesáhnout v žádném směru 5 mm. Koeficient tření mezi potrubím a vybraným uložením je 0,35. Parovod je umístěn na potrubním mostu s klesáním 3 ‰. Simulací v programu ChemCAD bylo prokázáno, že teplota média na konci potrubí poklesne pouze o cca 4 °C, z tohoto důvodu je ve výpočtu vliv poklesu teploty po délce potrubí zanedbán. Při provozu zařízení se nepředpokládá cyklické zatížení. Odchýlení od původně plánované trasy (např. pro účely ohybového kompenzátoru) nesmí překročit hodnotu 6 500 mm, z důvodu prostorové dispozice potrubního mostu.

4 PEVNOSTNÍ VÝPOČET

Tato kapitola je rozdělena do dvou hlavních částí. V kapitole 4.1 je proveden pevnostní výpočet pomocí programu AutoPIPE. V kapitole 4.2 je pro pevnostní výpočet využit program Ansys.

4.1 PEVNOSTNÍ VÝPOČET POMOCÍ PROGRAMU AUTOPIPE

Před provedením vlastního pevnostního výpočtu je potřeba vyřešit systém uložení potrubí, vyřešit teplotní dilataci potrubní trasy vhodným navržením a umístěním kompenzačních prvků, zkontrolovat posuvy hrdel a průhyby potrubí.

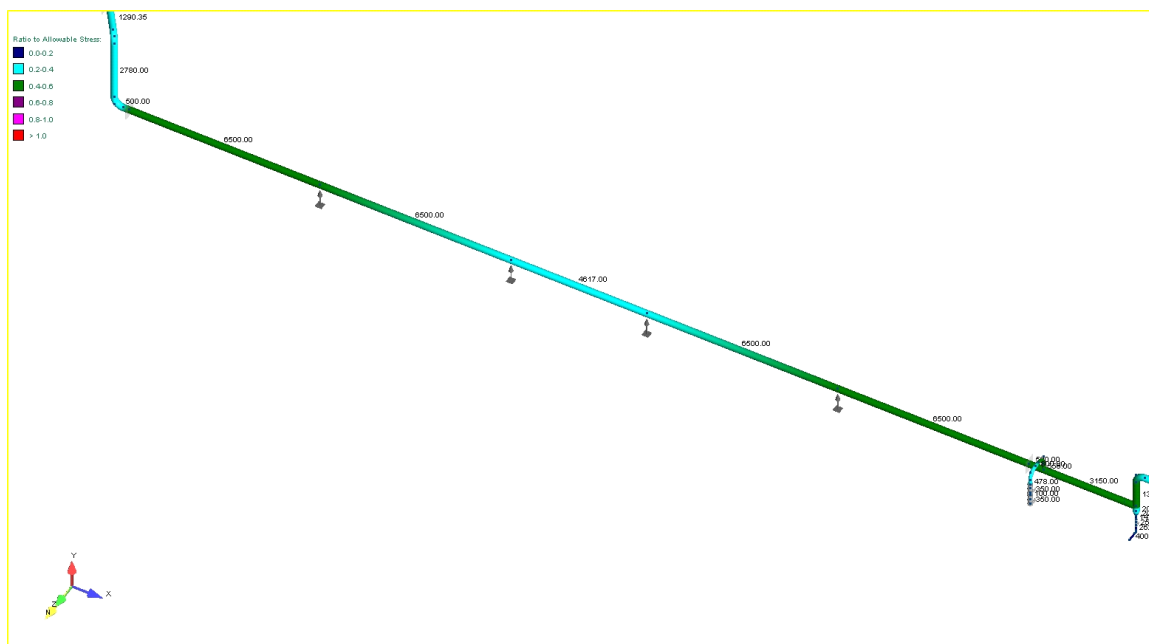
Poté bude proveden vlastní pevnostní výpočet pomocí programu AutoPIPE a následně bude výsledné napětí porovnáno s dovolenými hodnotami.

Pro grafickou prezentaci výsledného napětí je využíváno zobrazení poměru napětí ku napětí dovolenému. Program v jednotlivých uzlech vypočítá skutečnou hodnotu napětí a tuto hodnotu porovná s napětím dovoleným. Výsledek graficky prezentuje pomocí barevné škály, přičemž modrá barva indikuje velmi malou hodnotu poměru $\sigma/[\sigma]$, zelená barva pak dává vědět, že skutečné napětí je přibližně poloviční oproti dovolenému napětí, fialovou barvou jsou zvýrazněny oblasti, kde se skutečné napětí blíží maximální dovolené hodnotě, a červenou barvou jsou zvýrazněna místa, kde skutečné napětí překročilo dovolenou hodnotu.

4.1.1 Rozteč uložení

Pro výběr vhodné rozteče uložení použijeme pravidlo palce zmíněné v kapitole 1.5.1. Použijeme-li doporučený vzorec z rovnice (1.1), pro potrubí DN200 vyjde doporučená hodnota rozteče 5 656,845 mm. Z tabulky Tab. 1.1 pak vychází doporučená hodnota 7 300 mm. Je tedy zvolena střední hodnota rozteče uložení 6 500 mm a bude se dále zkoumat, jaké v potrubí vznikne napětí při zatížení gravitační silou a zda toto napětí vyhovuje normě, či nikoliv.

Pro rozteč uložení 6 500 mm byl získán tento výsledek, viz obr. 4.1.

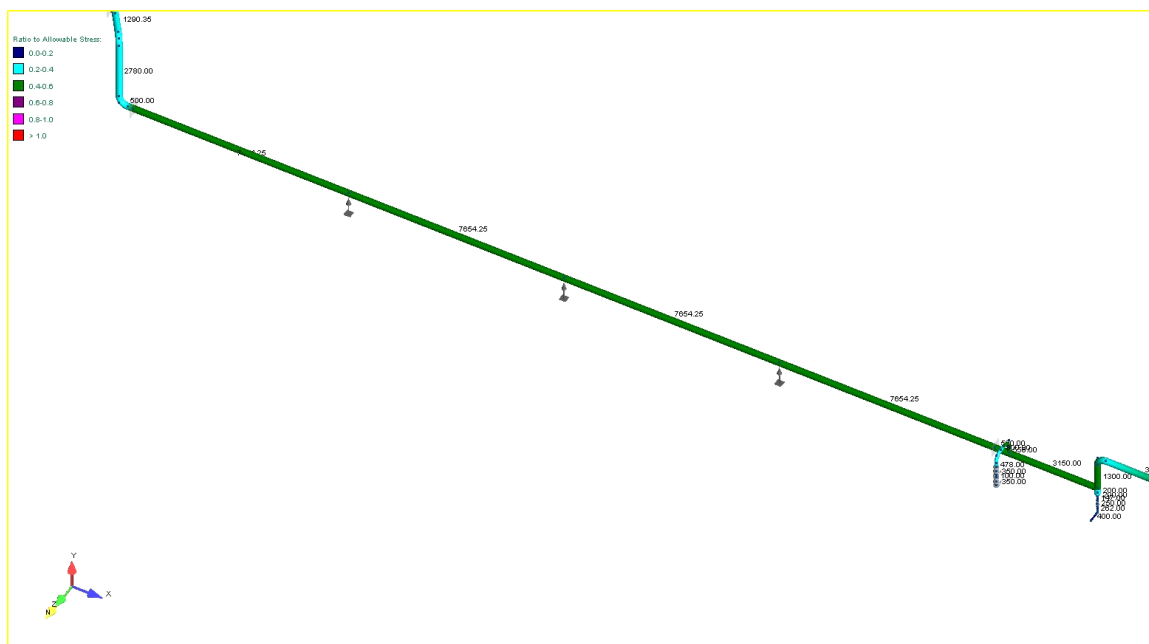


Obr. 4.1 Výsledný poměr napětí vyvolaného gravitační silou ku dovolenému napětí při rozteči uložení 6 500 mm

Z obrázku je patrné, že rozteč 6 500 mm normě vyhovuje a v potrubí nedochází k nepřípustnému napětí.

Vzhledem k tomu, že při použití čtyř podpěr na tomto úseku potrubí bylo vzniklé napětí s dostatečnou rezervou pod maximem přípustného napětí, nabízí se možnost použít podpěry pouze tři.

Pro použití tří podpěr byla zvolena rozteč 7 654,25 mm. Tato hodnota byla získána při rozdělení intervalu na 4 části, pro potřeby výrobního výkresu samozřejmě není nutné dodržovat přesnost na setiny milimetru a je možné rozměr upravit na vhodnější číslo. Výsledné napětí je zobrazeno na obr. 4.2.



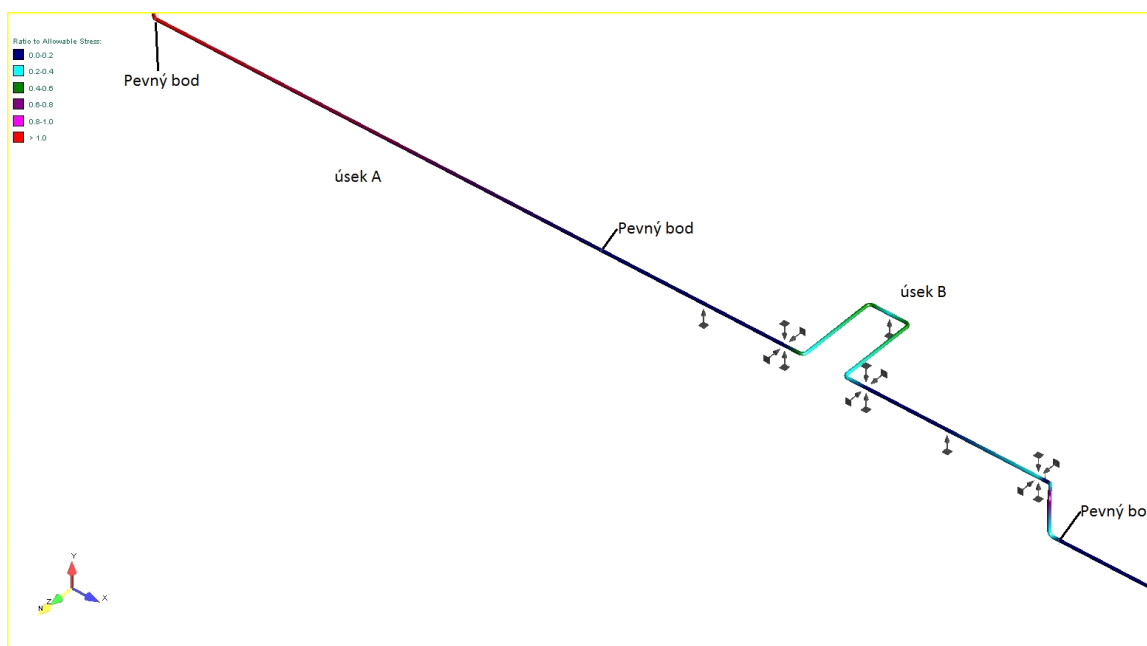
Obr. 4.2 Výsledný poměr napětí vyvolaného gravitační silou ku dovolenému napětí při rozteči uložení 7 654,25 mm

I při použití tří podpor napětí vyvolané gravitačním zatížením zůstává stále v dovolených hodnotách. Případné průhyby potrubí budou analyzovány v kapitole 4.1.5.

4.1.2 Kompenzátory

V rovných dlouhých úsecích potrubí dochází vlivem vysoké teploty k dilatacím, viz obr. 4.3. Na obrázku jsou zobrazeny dva přibližně stejně dlouhé úseky - úsek A a úsek B, oba s přibližnou délkou 30 m. V úseku A nejsou použity žádné prostředky pro kompenzaci teplotní dilatace, a jak je vidět, teplotní roztažnost vytváří v potrubí napětí, které překračuje normou stanovené povolené napětí.

Oproti tomu v úseku B je pro kompenzaci použit ohybový kompenzátor (tzv. U-kompenzátor). Díky použití kompenzátoru napětí vyvolané teplotní dilatací vyhovuje podmínkám normy.



Obr. 4.3 Ukázka vlivu dilatace na úsek A bez kompenzátoru a úsek B s kompenzátořem

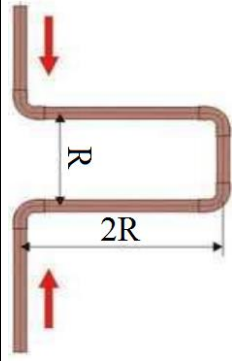
Teplotní dilatace úseku A i B by mohly být vyřešeny i jediným ohybovým kompenzátořem, nicméně rozměry tohoto kompenzátořu by způsobovaly komplikace v dispozičním řešení potrubní trasy. Je proto lepší použít dva kompenzátoře menších rozměrů.

4.1.3 Volba rozměrů ohybového kompenzátořu

Pro volbu rozměrů ohybového kompenzátořu existuje opět několik pomůcek a "pravidel palce". Tato pravidla představují doporučení pro projektanty potrubních tras a většinou jsou založena na určování rozměrů kompenzátořu pomocí výsledného dilatačního posunutí.

Ukázka doporučených rozměrů ohybového U-kompenzátořu je v tab. 4.1.

Vnější průměr trubky d [mm]	Prodloužení trubky Δl [mm]							
	12	25	38	50	75	100	125	150
	Charakteristický rozměr kompenzátoru R [mm]							
12	195	281	347	398	488	562	627	691
15	218	315	387	445	548	649	709	772
18	240	350	430	495	600	700	785	850
22	263	382	468	540	660	764	850	930
28	299	431	522	609	746	869	960	1056
35	333	479	593	681	832	960	1072	1185
42	366	528	647	744	912	1055	1178	1287
54	414	599	736	845	1037	1194	1333	1463
64	450	650	801	919	1126	1300	1453	1592
76,1	491	709	874	1002	1228	1418	1585	1736
88,9	531	766	944	1083	1327	1532	1713	1877
108	585	844	1041	1194	1463	1689	1888	2068
133	649	937	1155	1325	1623	1874	2095	2295
159	710	1025	1263	1449	1775	2049	2291	2510
219	833	1202	1482	1700	2083	2405	2689	2945
267	920	1328	1637	1878	2300	2655	2969	3252


Tab. 4.1 Doporučené rozměry U-kompenzátoru dle dilatačního prodloužení Δl [16]

Alternativou k určování rozměrů kompenzátoru pomocí výše zmíněné tabulky je výpočet pomocí vzorce, viz rovnice (4.1). [16]

$$2R = 25 \times \sqrt{(\Delta l \cdot d)} \quad (4.1)$$

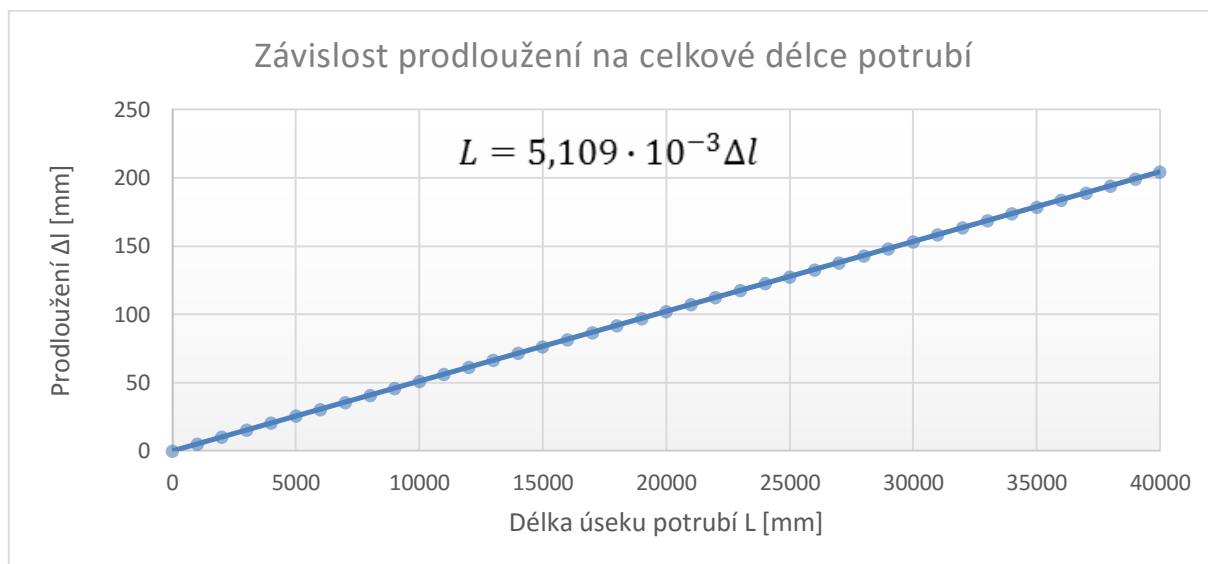
kde $2R$ charakteristický rozměr kompenzátoru [mm]

Δl prodloužení trubky [mm]

d vnější průměr trubky [mm]

V řešeném případě byl však postup opačný. Bylo zapotřebí určit, jaký rozměr kompenzátorů a jak frekventovaně umisťovat. Jako vstupní údaj sloužilo prostorové omezení na potrubním mostu, které nedovoluje zvolit rozměr $2R$ větší než 6,5 m. Z tabulky Tab. 4.1 plyne, že aby doporučené rozměry kompenzátoru nepřesáhly maximální hodnotu $2R$, prodloužení by se nemělo pohybovat za hranicí cca 150 mm. Pomocí vzorce je získána velmi podobná hodnota, a to $\Delta l_{max} = 154,3$ mm.

Frekvencovanost umístování kompenzátorů neboli jejich rozteč je možné stanovit na základě získaného Δl_{max} , a to pomocí délkové roztažnosti navrhovaného parovodu. Pro konkrétní zadaný materiál potrubí a návrhovou teplotu média byla pomocí analýzy v programu AutoPIPE získána závislost výsledného prodloužení způsobeného teplotní dilatací na délce analyzovaného úseku potrubí. Závislost je vyobrazena na obr. 4.4.



Obr. 4.4 Závislost prodloužení na celkové délce potrubí

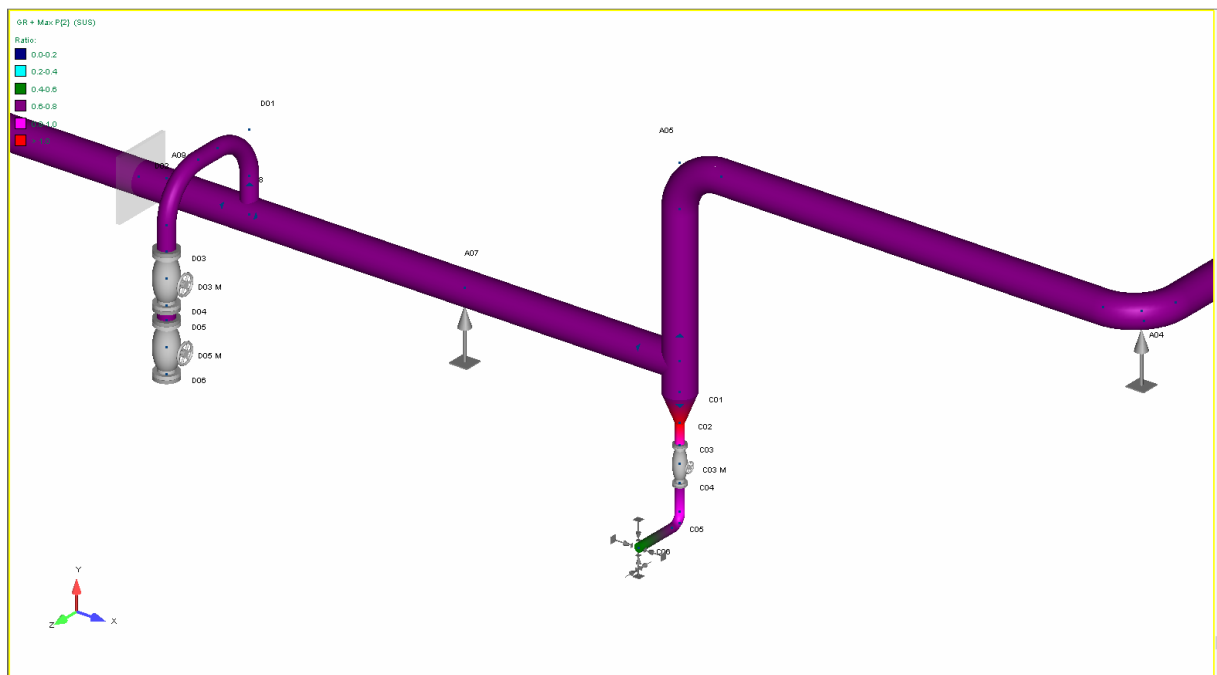
Z grafu plyne, že rozteče mezi jednotlivými kompenzátory by se měly pohybovat okolo 30 m. Byla tedy získána vzdálenost, při které je vhodné používat kompenzátory s charakteristickým rozměrem $2R = 6000 \div 6500 \text{ mm}$.

Vzhledem k tomu, že byly pro určení rozměrů ohybového kompenzátoru využívány především pravidla palce, je možné, že výsledné rozměry kompenzátoru budou odlišné od teoreticky stanovených hodnot. Za pomoci analýzy v programu AutoPIPE byly kompenzátory s charakteristickým rozměrem $2R = 6500 \text{ mm}$ vyhodnoceny jako zbytečně předimenzované. V zadané parovodní trase byly tedy použity ohybové U-kompenzátory s charakteristickým rozměrem $2R = 6000 \text{ mm}$.

4.1.4 Posuvy hrdel

Dle zadané podmínky nesmí výsledný posuv napojovacích hrdel překročit v žádném ze směrů 5 mm. Aby bylo dosaženo dodržení této podmínky, byly na konce hrdel umístěny podpory omezující posuv ve všech směrech dle výše zmíněné podmínky.

Na obr. 4.5 je vidět příklad napojovacího hrdla, na které bylo aplikováno omezení posuvu. Toto omezení vyvolává zvýšené napětí překračující napětí dovolené, jak je vidět na obr. 4.5. Největší napětí je v bodě C02 v místě redukce většího průměru potrubí na menší.



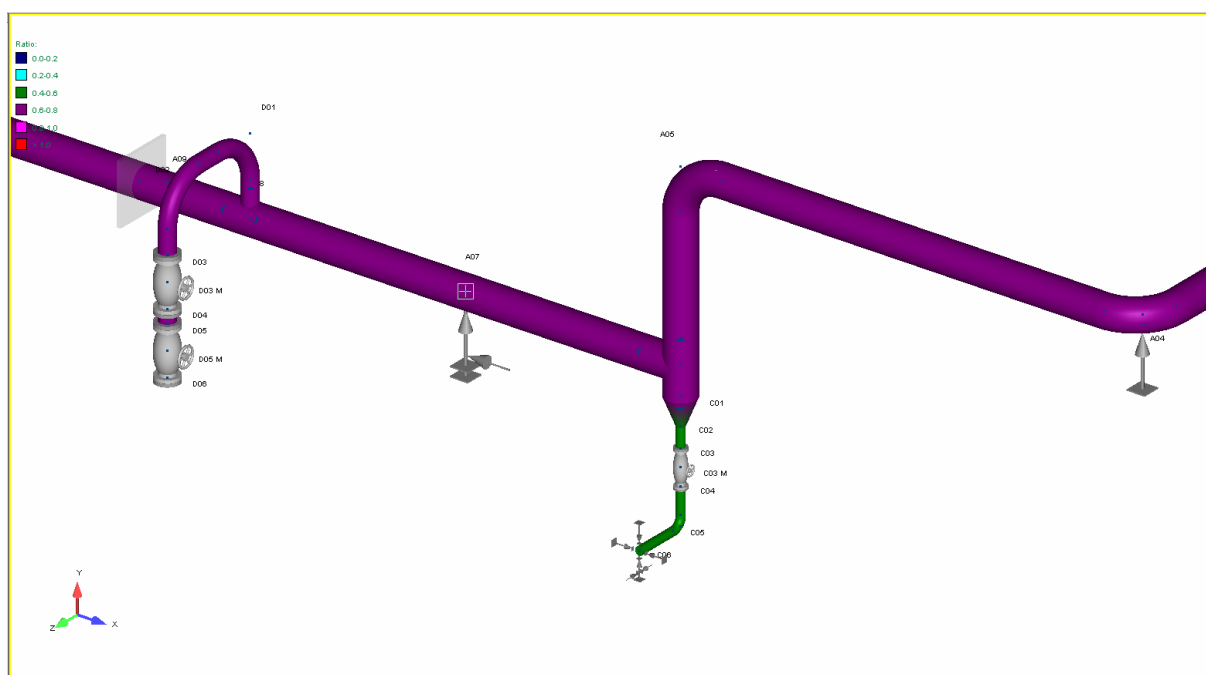
Obr. 4.5 Zvýšené napětí při omezení posuvu hrdla

Příčinu tohoto zvýšeného napětí lze vyčíst z obr. 4.6, jež zobrazuje posuvy jednotlivých bodů včetně rozdělení dle toho, co tento posuv způsobilo. Pro bod C02 a okolní body lze vidět velký posuv v kladném směru osy x způsobený tepelnou roztažností.

Displacement		Force/Moment	Anchor	Support	Code Stresses					
Seg	Point	Combination	DX	DY	DZ	DR	RX	RY	RZ	RR
			mm	mm	mm	mm	deg	deg	deg	deg
C	A06	Thermal 1{2}	20.17	0.64	13.31	24.17	0.23	-0.30	0.06	0.38
		Pressure 1{2}	0.16	-0.00	0.08	0.17	0.00	-0.00	0.00	0.00
		GT1{2}	20.17	-0.35	13.44	24.24	0.23	-0.30	0.02	0.38
		GT1P1{2}	20.33	-0.35	13.51	24.41	0.23	-0.30	0.02	0.38
		Gravity{2}	-0.13	-0.99	0.12	1.01	0.00	-0.00	-0.04	0.04
C	C01	Thermal 1{2}	20.35	-0.38	12.52	23.90	0.23	-0.30	0.05	0.38
		Pressure 1{2}	0.16	-0.01	0.07	0.17	0.00	-0.00	0.00	0.00
		GT1{2}	20.22	-1.37	12.64	23.88	0.23	-0.30	0.01	0.38
C	C02	GT1P1{2}	20.38	-1.38	12.70	24.05	0.23	-0.30	0.01	0.38
		Gravity{2}	-0.26	-0.99	0.11	1.03	0.00	-0.00	-0.04	0.04
C	C02	Thermal 1{2}	20.49	-1.41	11.71	23.64	0.24	-0.31	0.03	0.39
		Pressure 1{2}	0.16	-0.02	0.06	0.17	0.00	-0.00	-0.00	0.00
		GT1{2}	20.23	-2.39	11.82	23.55	0.24	-0.31	-0.00	0.39
		GT1P1{2}	20.39	-2.41	11.87	23.72	0.24	-0.31	-0.00	0.40
		Gravity{2}	-0.36	-0.99	0.10	1.06	0.00	-0.00	-0.04	0.04
C	C03	Thermal 1{2}	20.28	-2.16	10.97	23.16	0.33	-0.50	-0.18	0.63
		Pressure 1{2}	0.15	-0.02	0.05	0.16	0.01	-0.01	-0.00	0.01
		GT1{2}	19.92	-3.15	11.08	23.01	0.33	-0.51	-0.22	0.64
		GT1P1{2}	20.07	-3.16	11.12	23.16	0.34	-0.51	-0.23	0.65
		Gravity{2}	-0.44	-0.99	0.10	1.09	0.00	-0.00	-0.04	0.04

Obr. 4.6 Posuvy bodů dle příčiny

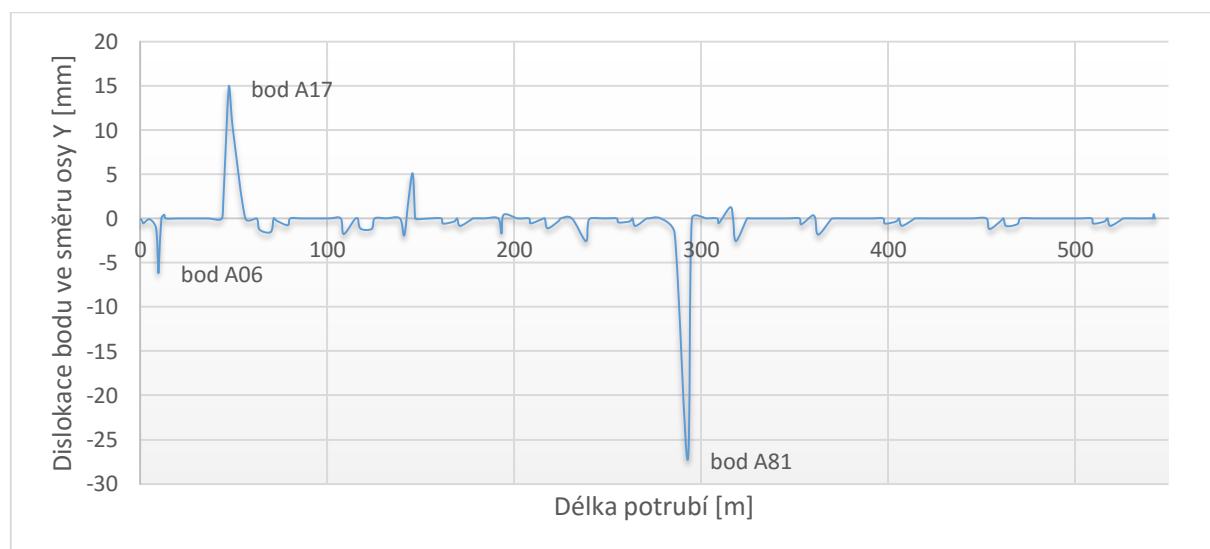
Aby byl tento posuv minimalizován a spolu s ním i napětí, je třeba zamezit zvýšenému posuvu ve směru x, tedy ve směru potrubí. Dilataci by bylo možné omezit pomocí kompenzátoru, v tomto případě však posuvy nejsou natolik velké a postačí proto zabránit posuvu pomocí vhodného uložení potrubí. Na obr. 4.7 lze vidět, že přidáním omezení posuvu v kladném směru x v uložení v bodě A06 se napětí působící v hrdle snížilo na přijatelnou mez.



Obr. 4.7 Snížené napětí v hrdle pomocí omezení pohybu

4.1.5 Kontrola průhybu potrubí

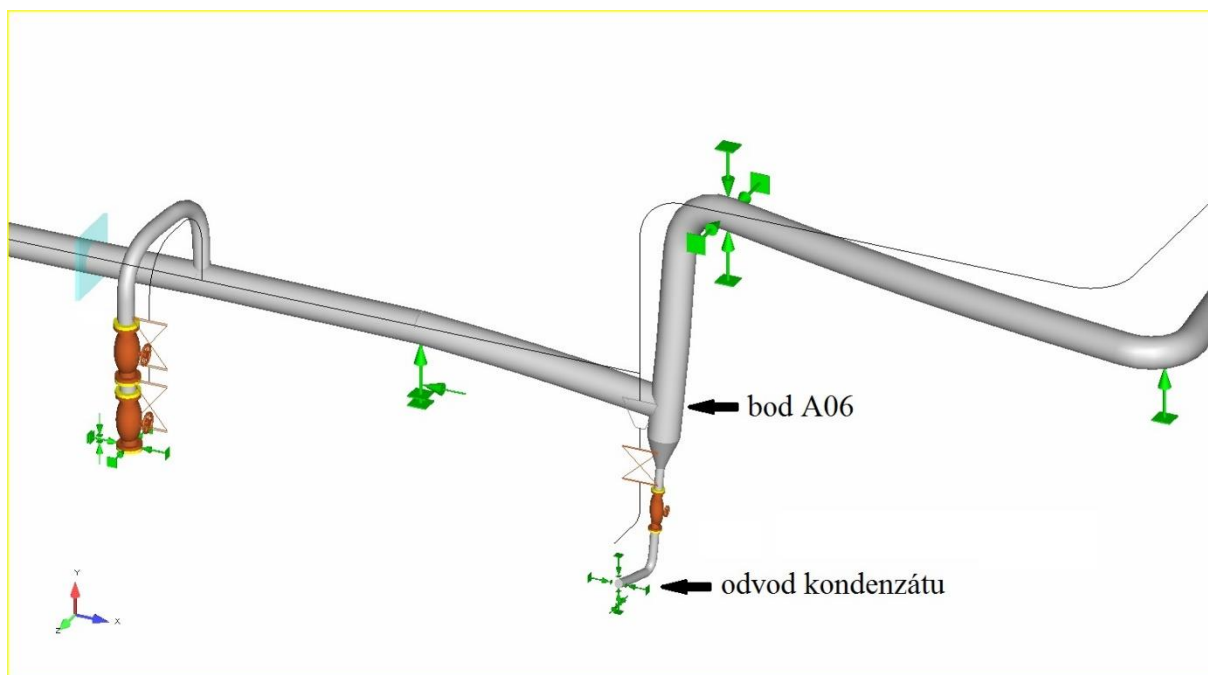
Problémy spojené s průhybem parovodního potrubí byly již popsány v kapitole 2.2. Pro kontrolu, zda se v zadané parovodní trase nevyskytují nebezpečné průhyby, byla v hlavní větvi vykreslena závislost dislokací ve směru osy y (tedy ve vertikálním směru) na délce potrubí. Tato závislost je znázorněna na obr. 4.8.



Obr. 4.8 Závislost dislokací ve vertikálním směru na délce potrubí

Z grafu je patrné, že dislokace se kromě několika bodů drží pod hranicí 5 mm, což se dá považovat za přípustné vzhledem k průměru a délce potrubí. U zbylých bodů je třeba prověřit, zda v potrubní trase nebudou vytvářet průhyby, ve kterých by se shromažďoval kondenzát.

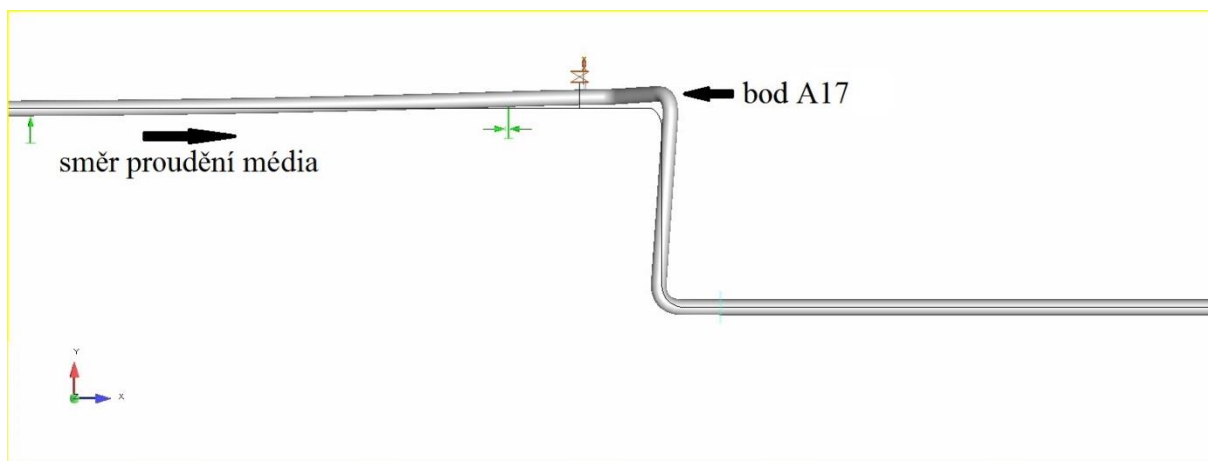
Bod A06 je vlivem zatížení snížen o 6,19 mm oproti své původní pozici. Je třeba tento bod dohledat a zjistit, jak ovlivní chování parovodu.



Obr. 4.9 Dislokace bodu A06 vyvolaná zatížením potrubí

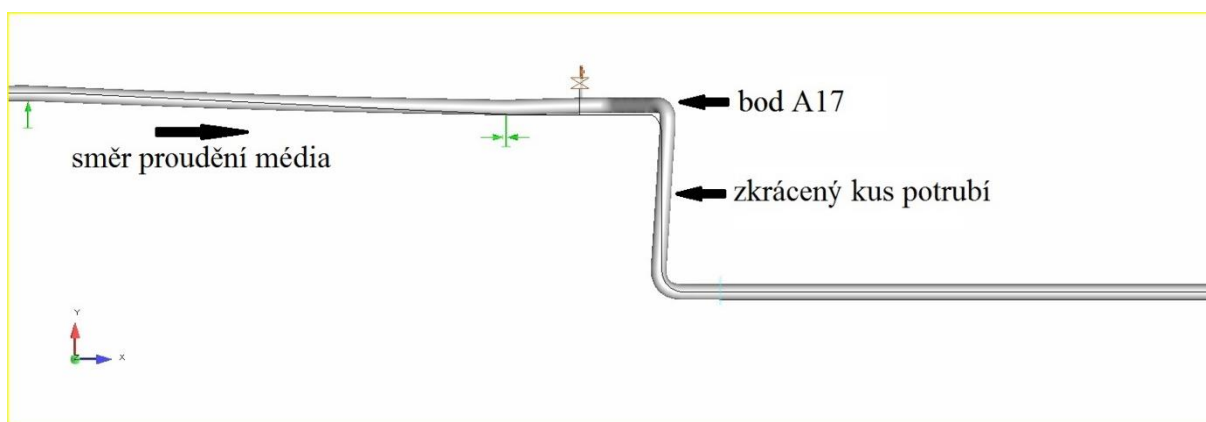
V tomto případě však dislokace bodu A06 nepřináší komplikace spojené s průhybem potrubí, neboť právě v tomto místě je situován i odvod kondenzátu, jak lze vidět na obr. 4.9. V průhybu se tedy kondenzát hromadit nebude, místo toho bude odtékat příslušným potrubím.

Dalším místem, kde je výrazná dislokace – i když tentokrát v kladném směru osy y – je bod A17. V tomto místě je potrubí vlivem zatížení vyvýšeno oproti původnímu stavu o 14,74 mm. Jednoduchým řešením může být zkrácení vertikálního kusu potrubí, který způsobuje vertikální posuv bodu A17 a vytvoření určitého předpětí, kdy je dopředu počítáno s dilatací. Na obr. 4.10 je vidět situace před aplikováním řešení, v potrubní trase vlivem dilatace vzniká stoupání končící v bodě A17.



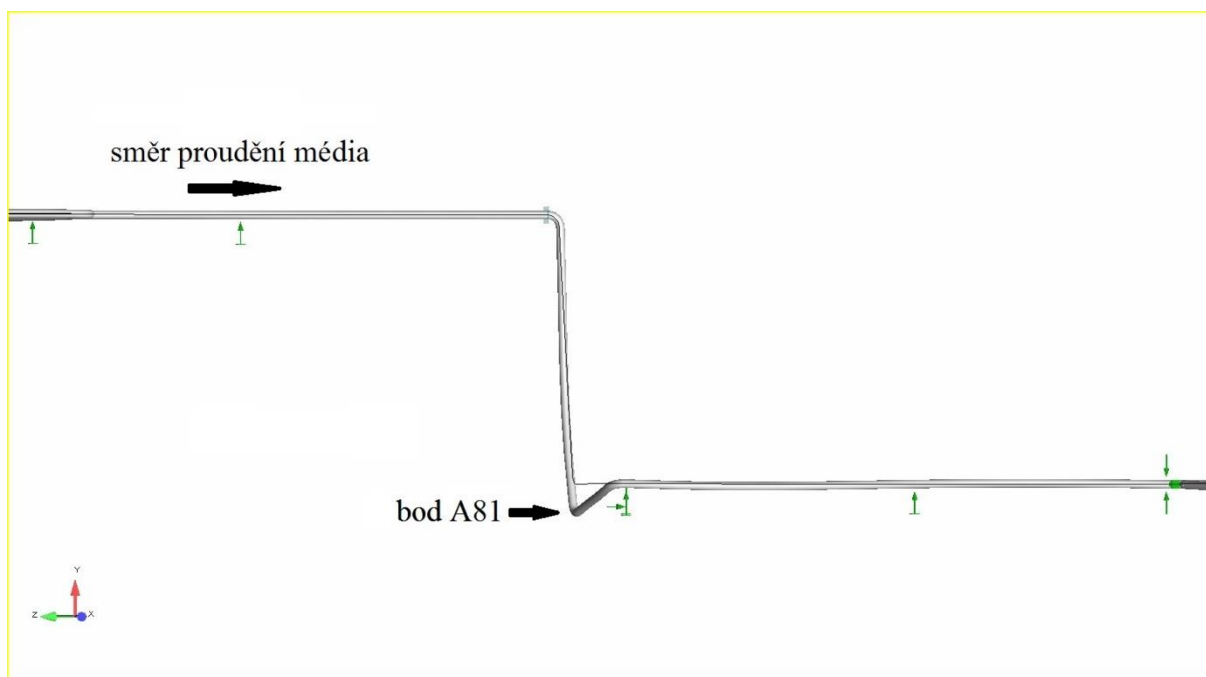
Obr. 4.10 Vyvýšení bodu A17 vlivem teplotní dilatace

Na obr. 4.11 je pak vidět vyřešení problému s vyvýšeným bodem pomocí zkrácení vertikálního kusu potrubí.



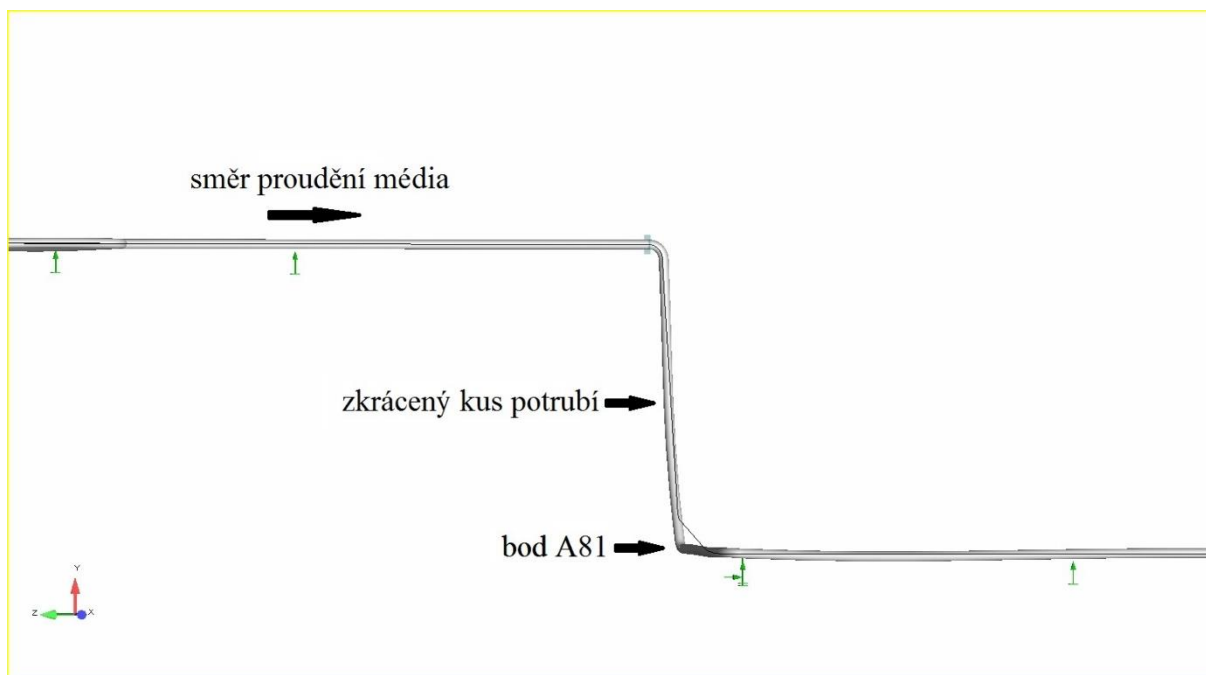
Obr. 4.11 Odstranění stoupání pomocí zkrácení vertikálního kusu potrubí

Místem s největší horizontální dislokací je však bod A81, což je zřetelně vidět na obr. 4.8. V tomto bodě dosáhl posun v záporném směru osy y hodnoty -27,31 mm. V potrubní trase se tento bod nachází za vertikálním klesáním, jak je vidět na obr. 4.12.



Obr. 4.12 Průhyb potrubí vzniklý působením teplotní dilatace

Z obrázku je také patrné, že za klesáním větve vznikne průhyb, ve kterém se pravděpodobně bude hromadit kondenzát. Jedním z řešení průhybu je stejně jako v předchozím případě zkrátit vertikální kus potrubí tak, aby po dilataci nezpůsobil průhyb, viz Obr. 4.13.



Obr. 4.13 Odstranění průhybu potrubní trasy pomocí zkrácení vertikálního kusu potrubí

Vzhledem k poloze tohoto místa by však pravděpodobně nejlepším řešením bylo vytvořit v bodě A81 odvod kondenzátu. Přidávat potrubní větve však není v kompetenci autora výpočtu, tudíž je možným řešením předání poznatků kompetentní osobě.

4.1.6 Pevnostní výpočet potrubní trasy

Vlastní pevnostní výpočet potrubní trasy byl proveden za pomoci programu AutoPIPE. Do programu bylo třeba zadat okrajové podmínky (viz kapitola 3.2), jako např. použitý materiál, okolní teplota, návrhová teplota a tlak, korozní přírůstek, výrobní tolerance, rozměry jednotlivých potrubních větví a mnoho dalších parametrů.

Potrubí se následně zatížilo daným tlakem a teplotou, program sám automaticky vypočítal váhu potrubí a potrubí bylo zatíženo také gravitací. Je možné přidat také další zatížení, jako např. seizmické zatížení, zatížení sněhem, zatížení větrem aj., nicméně tato zatížení nebyla v zadání uvažována.

Program AutoPIPE je schopný vyhodnocovat napětí podle velké řady světových norem. Podle normy ČSN EN 13480 pak dělí jednotlivá napětí na: [13]

- Napětí od trvalých zatížení (kap. 12.3.2. v normě ČSN EN 13480)
- Napětí od trvalých a občasných nebo mimořádných zatížení (kap. 12.3.3. v normě ČSN EN 13480)
- Rozkmit napětí od teplotní dilatace a střídavých zatížení (kap. 12.3.4. v normě ČSN EN 13480)

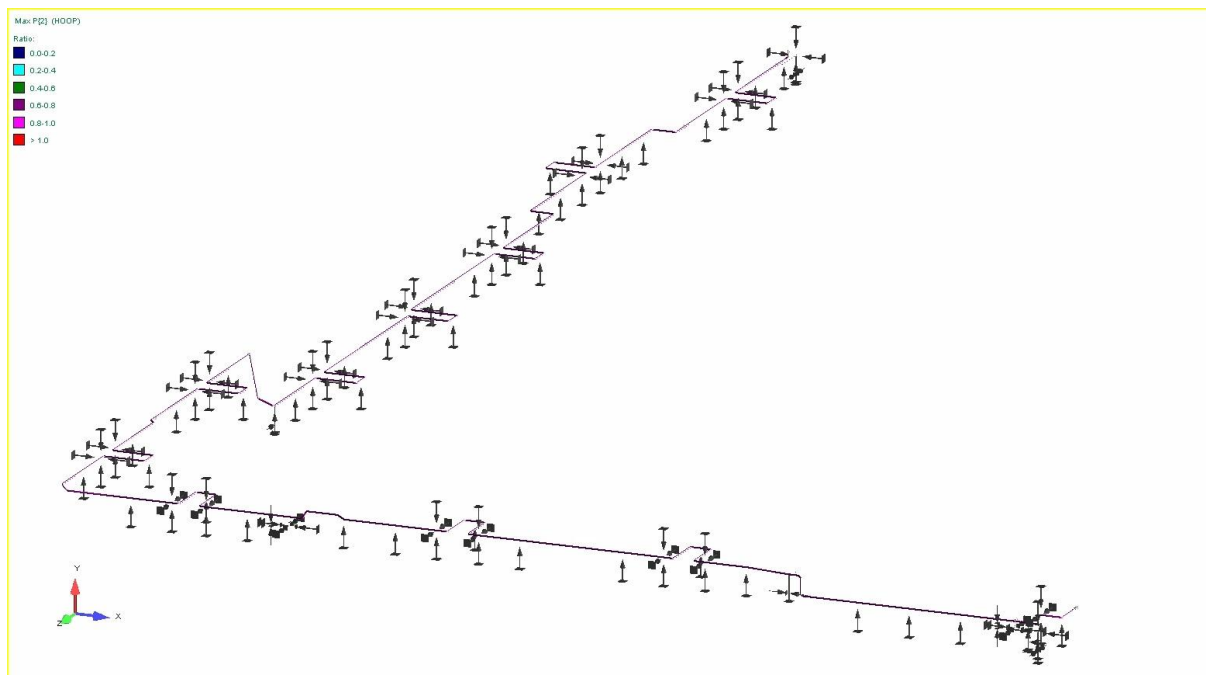
Program hodnotí tato tři napětí ve všech svých uzlech a hodnoty porovnává s hodnotami dovoleného napětí. V grafickém výstupu pak podle barevné škály zvýrazňuje místa, kde se skutečné napětí přiblížilo napětí dovolenému. Pokud vypočítané napětí překročí dovolené napětí, je toto místo zobrazeno červeně.

Z programu je pak možné generovat zprávu, kde jsou vypsány hodnoty napětí, posuvů a působících sil a momentů pro všechny body. Zpráva bývá zpravidla velmi obsáhlá, pro závěrečné shrnutí jsou proto vybrány pouze body s nejvyššími hodnotami napětí v dané kategorii. Tyto hodnoty jsou prezentovány v tab. 4.2.

Typ napětí	Uzel	Výsledné napětí [MPa]	Dovolené napětí [MPa]	Stav
Maximální napětí od trvalých zatížení	A56	52	76	Vyhovuje
Maximální membránové napětí	A145	60	76	Vyhovuje
Maximální napětí od teplotní dilatace	C02	177	188	Vyhovuje

Tab. 4.2 Shrnutí maximálních výsledných napětí z analýzy v programu AutoPIPE

Na obr. 4.14 je zobrazen model parovodu po aplikaci všech úprav včetně uložení.



Obr. 4.14 Výsledný model parovodu po aplikaci všech úprav

4.2 PEVNOSTNÍ VÝPOČET POMOCÍ PROGRAMU ANSYS

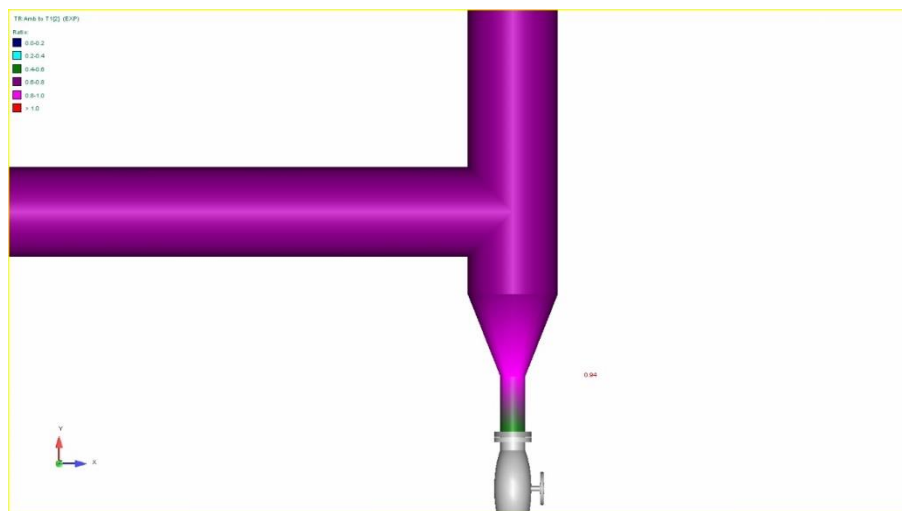
Pomocí programu AutoPIPE byla provedena kontrola, zda napětí v potrubí nepřesahuje dovolené hodnoty. Dovolené napětí v žádném místě potrubí překročeno nebylo, nicméně v oblastech, kde se výsledné napětí blíží maximálnímu dovolenému napětí, je vhodné provést důkladnější 3D MKP analýzu. K tomuto účelu byl zvolen program Ansys, konkrétně prostředí Ansys Workbench.

Pro vytvoření modelu pro analýzu v programu Ansys byl vybrán program SolidWorks. V tomto programu byly vytvořeny 3D modely dle zadání a následně pomocí univerzálního formátu (např. STEP s příponou .stp nebo IGES s příponou .igs) vloženy do programu Ansys.

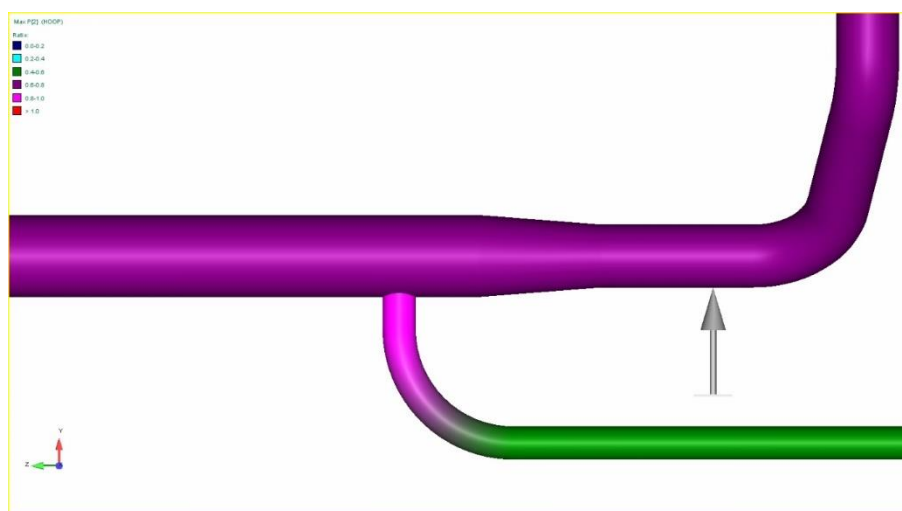
4.2.1 Kritická místa pro kontrolu v programu Ansys

V modelu potrubí se vyskytla tři místa, ve kterých se výsledné napětí dle výsledků programu AutoPIPE přiblížilo hodnotě maximálního dovoleného napětí. Jedná se konkrétně o redukci (obr. 4.15), hrdlo odvodu kondenzátu (obr. 4.16) a hrdlo odběrového místa (obr. 4.17).

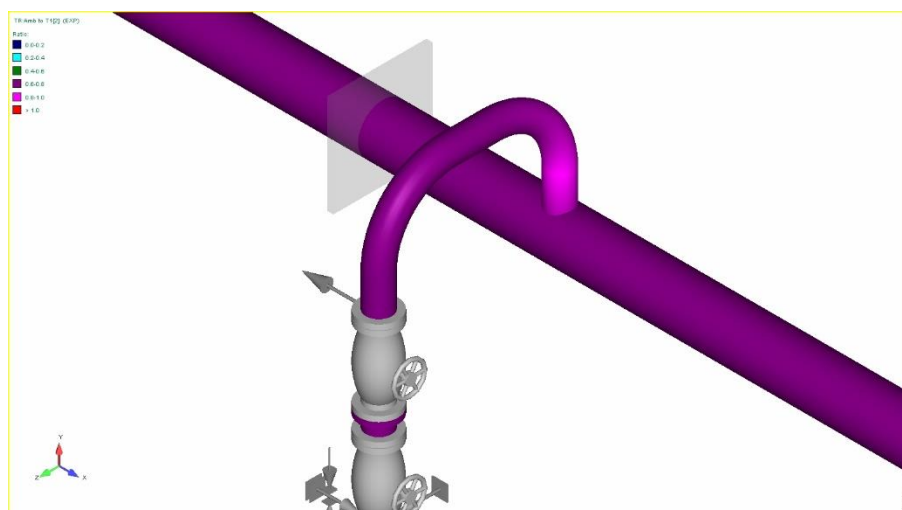
Pro výpočet těchto prvků byl použit princip tzv. submodelingu, tedy detailního vymodelování určité části celku, kdy okrajové podmínky byly převzaty z analýzy celkového modelu. V tomto případě bylo převzato zatížení v koncových bodech z výsledků v programu AutoPIPE. Zatížení bylo vyvoláno působením tlaku 3,85 MPa, teplotní roztažností při teplotě 380 °C a působením vlastní tíhy potrubí.



Obr. 4.15 Kritické místo pro analýzu v programu Ansys - redukce



Obr. 4.16 Kritické místo pro analýzu v programu Ansys – hrdlo odvodu kondenzátu



Obr. 4.17 Kritické místo pro analýzu v programu Ansys – hrdlo odběrového místa

Co se týče provedení redukce, nabízí se i jiné alternativní varianty provedení. Redukce vytváří přechod mezi potrubím o vnějším průměru 219,1 mm na 60,3 mm. Redukce pro takovýto přechod nejsou standardizované, a tudíž nejsou běžně k dostání. Za standardizované řešení by se dalo považovat ukončení potrubí DN 200 klenutým dnem (v tomto případě dýnkem) a navázání hrdlem na požadovaný průměr potrubí. Jinou variantou je pak jako přechodný kus využít redukci s přizpůsobeným tvarem, který minimalizuje ostré přechody. Tyto tři varianty byly zohledněny při výpočtu a bude vybrána neoptimálnější varianta.

4.2.2 Kategorizace napětí

Dříve, než budou výsledná napětí srovnána s dovolenými napětími dle normy ČSN EN 13 480, je vhodné napětí rozdělit do jednotlivých kategorií, díky čemuž je možné brát ohled na původ napětí – deformační či silový a vyhnout se zbytečnému předimenzování zařízení. Zatížení lze zařazovat do těchto kategorií: [17]

σ_m – prosté membránové napětí od silového zatížení

σ_b – prosté ohybové napětí od silového zatížení

σ_{mL} – místní membránové napětí od silového zatížení

σ_{bL} – místní ohybové napětí od zatížení silového a deformačního zatížení

σ_T – základní teplotní napětí

σ_K – kompenzační napětí

σ_{TL} – teplotní lokální napětí

Skupiny kategorií napětí: [17]

$$(\sigma)_1 = \sigma_m \leq f \quad (4.2)$$

$$(\sigma)_2 = (\sigma_m \text{ nebo } \sigma_{mL}) + \sigma_b \leq 1,5 \cdot f \quad (4.3)$$

$$(\sigma)_R = (\sigma_m \text{ nebo } \sigma_{mL}) + \sigma_b + \sigma_{bL} + \sigma_K + \sigma_T + \sigma_{TL} \leq \min \left\{ 2,5 - \frac{R_e}{R_m}; 2 \right\} \cdot R_e \quad (4.4)$$

kde f dovolené namáhání [MPa]

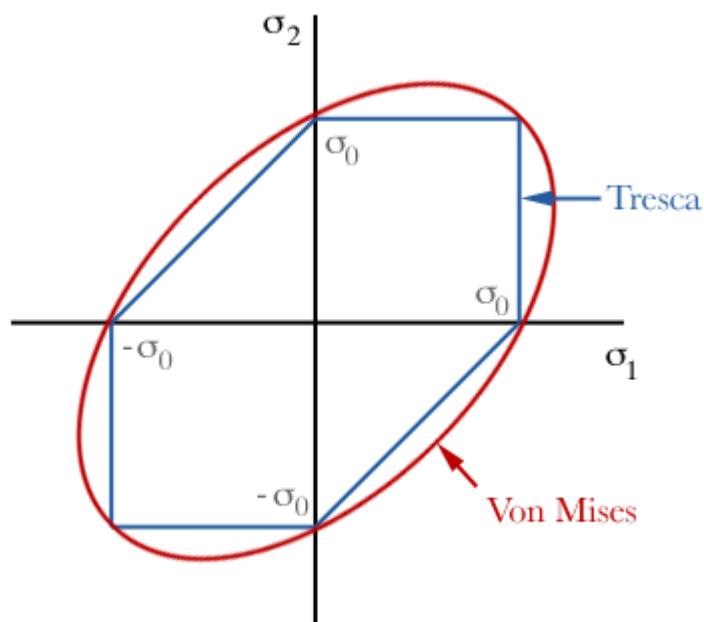
R_e mez kluzu v tahu [MPa]

R_m mez pevnosti v tahu [MPa]

Jsou-li splněny rovnice (4.2) - (4.4), konstrukce splňuje požadavky pro dovolené zatížení. Rovnice (4.4) může být při statickém výpočtu zanedbána, neboť popisuje rozkmit napětí a její aplikace je při cyklickém zatížení.

Pro skupiny napětí se využívají tzv. redukovaná napětí, tedy napětí, které je vypočtené ze součtu složek tenzoru napětí. Způsobů výpočtu redukovaného napětí je několik, mezi nejčastěji používané teorie patří hypotéza HMM (Huber, von Mises, Hencky), někdy označovaná jen jako metoda von Mises, nebo hypotéza maximálních smykových napětí² (též Trescova hypotéza). Porovnání těchto dvou hypotéz je na obr. 4.18. Z obrázku je patrné, že hypotéza maximálních smykových napětí je více konzervativní. [18]

² V programu Ansys je hypotéza maximálních smykových napětí označena jako Stress Intensity.



Obr. 4.18 Srovnání Trescovy hypotézy s hypotézou von Mises [19]

Pro výpočet redukovaného napětí v řešeném případě byla vybrána hypotéza maximálních smykových napětí. Dá se sice oproti hypotéze HMMH označit za méně přesnou, nicméně je více konzervativní a tudíž zaručuje, že se při výpočtu bude projektant pohybovat na bezpečné straně³.

³ “Pohybovat se na bezpečné straně“ je pojem používaný v technické praxi, který zjednodušeně představuje způsob rozhodování projektanta. Pokud projektant má při výpočtu volbu (jakou použít hypotézu, konstantu, jaké uvažovat chování materiálu atd.) a rozhodne se zvolit variantu, která potenciálně přináší horší výsledky, pohybuje se takzvaně na bezpečné straně. Pokud výpočet vyhovuje podmínkám i s horšími volbami, pak má projektant jistotu, že všechny ostatní volby situaci nemohou zhoršit.

4.2.3 Dovolené namáhání

Dovolené namáhání pro neaustenitické oceli je charakterizováno v normě ČSN EN 13480 v části 3. Hodnota dovoleného napětí se vypočítá dle vzorce (4.5). [13]

$$f = \min \left\{ \frac{R_{eH\,t}}{1,5} \text{ nebo } \frac{R_{p0.2\,t}}{1,5}; \frac{R_m}{2,4} \right\} \quad (4.5)$$

kde	f	Dovolené namáhání [MPa]
	$R_{eH\,t}$	Minimální specifikovaná hodnota horní meze kluzu při výpočtové teplotě, když je tato teplota vyšší než pokojová teplota [MPa]
	$R_{p0.2\,t}$	Minimální specifikovaná hodnota smluvní meze kluzu při výpočtové teplotě, když je tato teplota vyšší než pokojová teplota [MPa]
	R_m	mez pevnosti v tahu [MPa]

Pro daný materiál 12021.1 a danou výpočtovou teplotu 380 °C jsou materiálové charakteristiky následující:

$$R_m = 360 \text{ MPa}$$

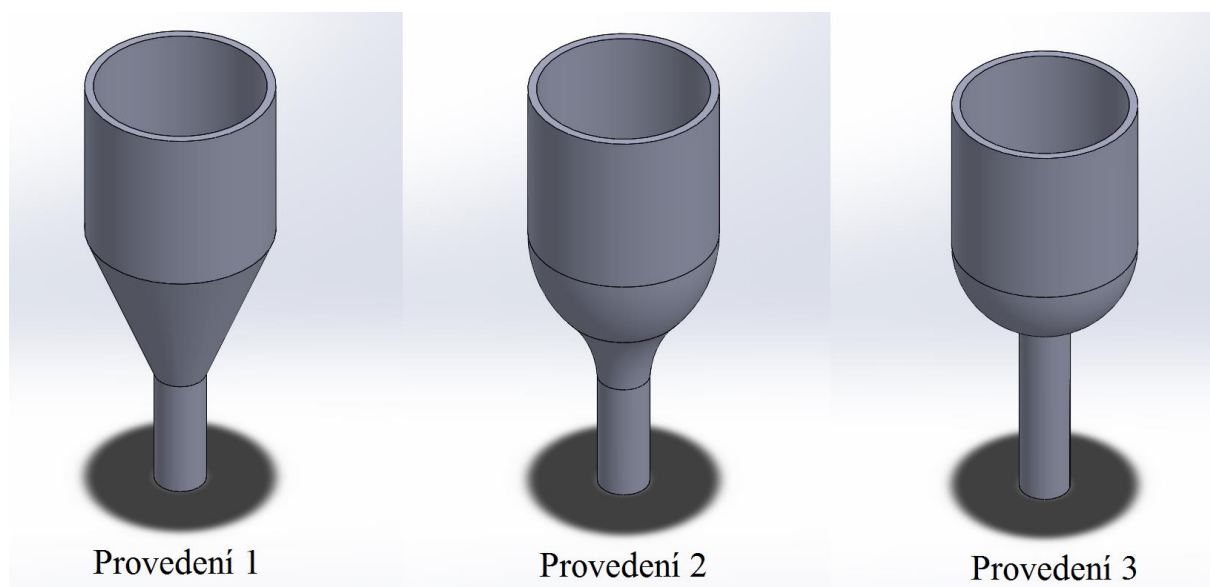
$$R_{p0.2\,t=380^\circ\text{C}} = 118 \text{ MPa} \quad \text{*hodnota získána interpolací materiálových charakteristik}$$

Výsledné dovolené namáhání je pak dle vzorce (4.5):

$$f = 76 \text{ MPa.}$$

4.2.4 Kritické místo – redukce

Jak již bylo zmíněno, pro analýzu redukce byly vybrány tři formy provedení, které jsou znázorněny na obr. 4.19.

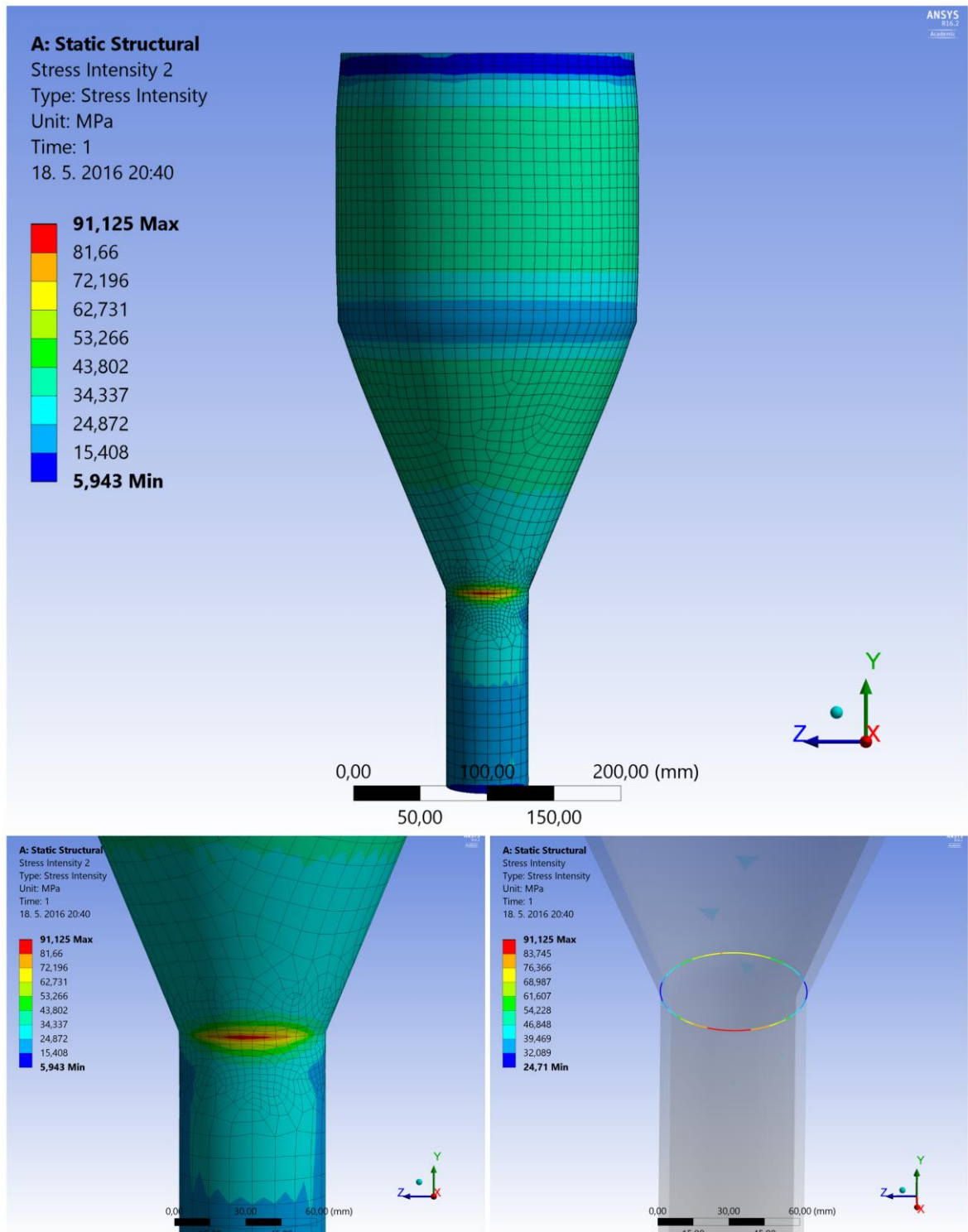


Obr. 4.19 Provedení redukcí pro analýzu MKP

U všech provedení redukce je třeba nalézt místo s největší koncentrací napětí a poté vykreslit průběh membránového a součtu membránového a ohybového napětí, aby bylo možné využít rovnice (4.2) a (4.3).

Provedení 1

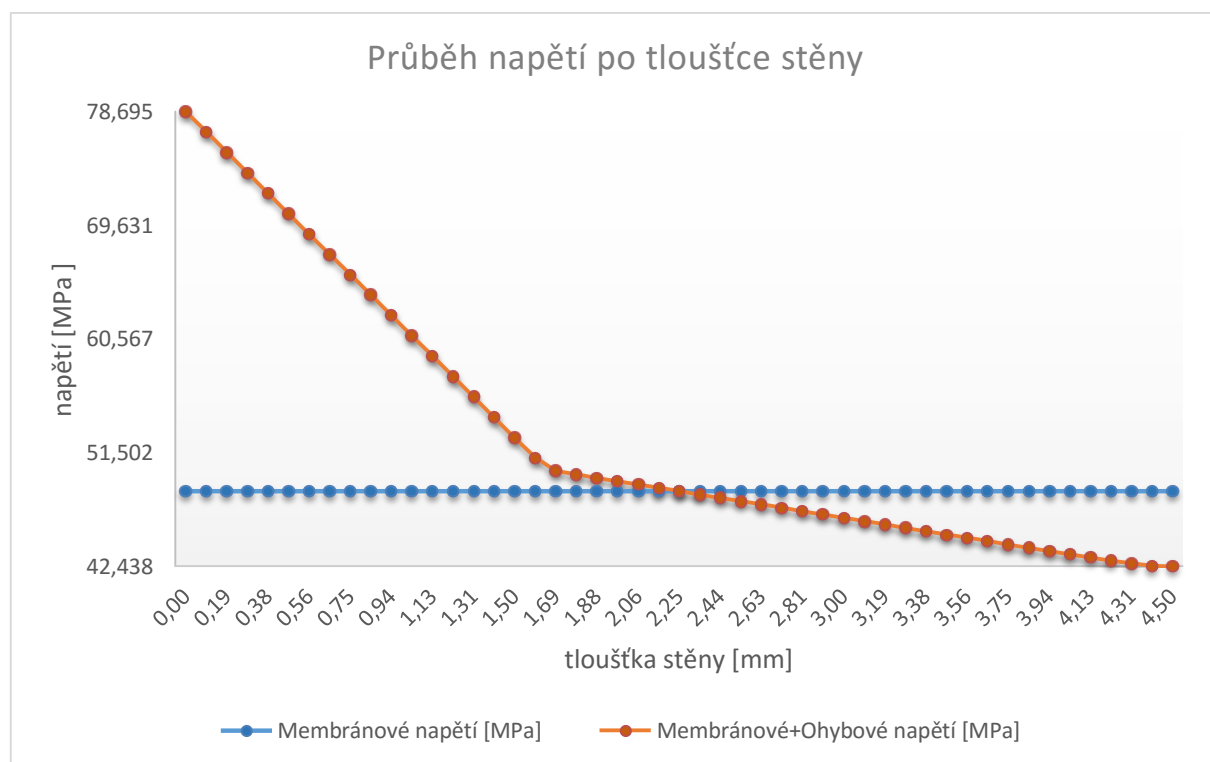
Na obr. 4.20 jsou zobrazeny grafické výstupy analýzy pro obyčejnou redukci. Z obrázku je patrné, že nejkritičtější místo je v místě napojení redukce na potrubí s menším průměrem. V tomto místě byla proto zjemněna síť, aby bylo dosaženo přesnějších výsledků.



Obr. 4.20 Grafické zobrazení výsledků analýzy pro provedení 1 (nahore: celkový pohled na analyzovanou část, vlevo dole: detail na kritické místo s nejvyšším napětím, vpravo dole: průběh napětí po obvodu přechodu mezi redukcí a potrubím)

V obrázku v pravém dolním rohu lze vidět, že nejvyšší napětí leží přibližně v blízkosti průsečíku roviny dělicí redukci od potrubí DN 50 a osy x. Pro přesnější definici místa s nejvyšším napětím je možné nechat program vypsat napětí pro jednotlivé uzly a vyhledat uzel s nejvyšší hodnotou napětí.

Po lokalizování místa s nejvyšším napětím je vykreslen průběh tohoto napětí po tloušťce stěny, přičemž je zvlášť vykreslen průběh membránového napětí a součtu membránového a ohybového napětí. Pro provedení 1 je průběh napětí zobrazen na obr. 4.21.



Obr. 4.21 Průběh napětí po tloušťce stěny u provedení 1

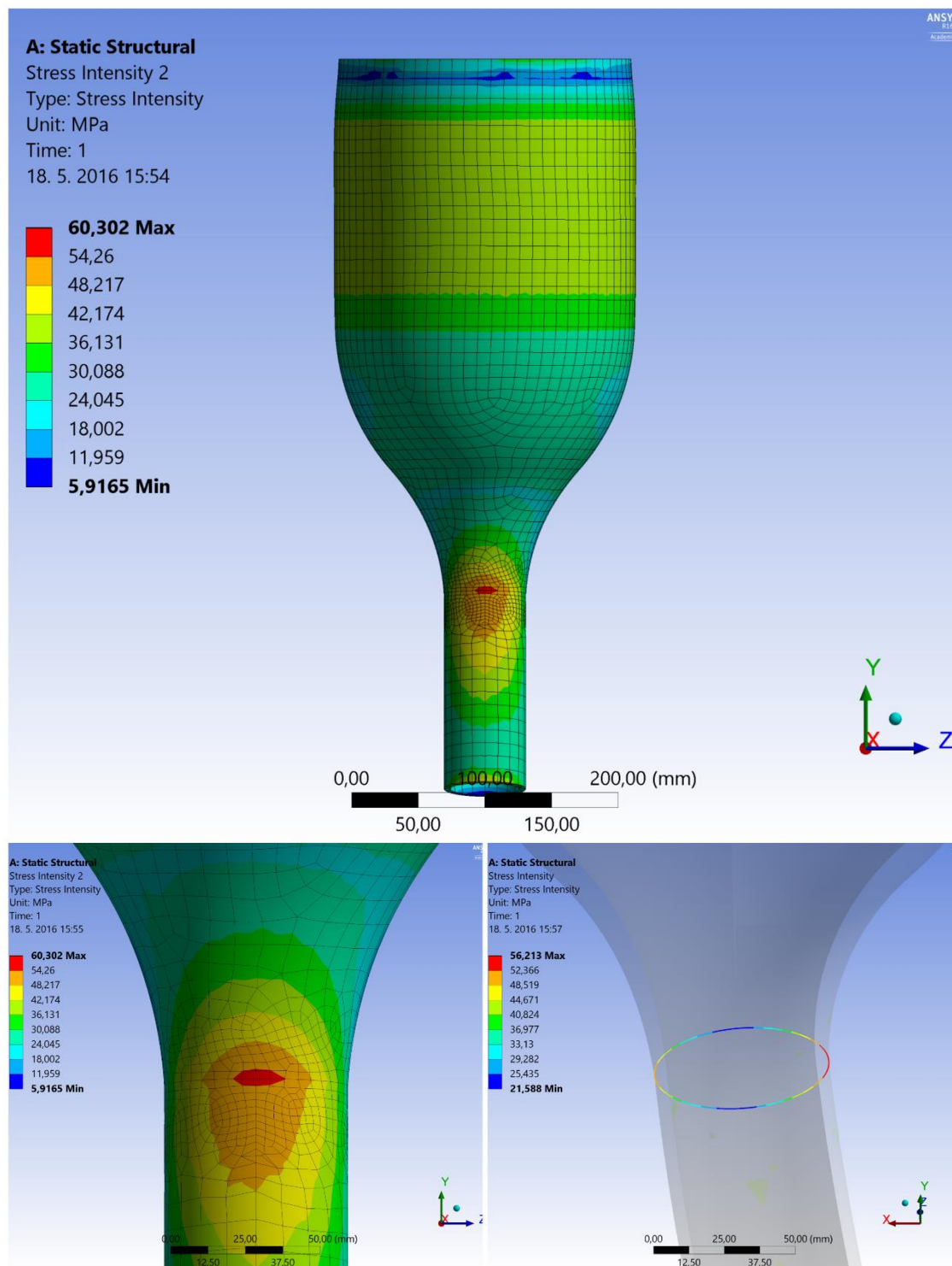
Získané hodnoty membránového a ohybového napětí jsou dále porovnány s dovoleným napětím v tab. 4.3.

Typ napětí	Kategorie napětí	Výsledné napětí [MPa]	Dovolené napětí [MPa]	Stav
Membránové	$(\sigma)_1$	40,129	76	$(\sigma)_1 < f$ podmínka splněna
Membránové + Ohybové	$(\sigma)_2$	69,657	114	$(\sigma)_2 < 1,5 \cdot f$ podmínka splněna

Tab. 4.3 Posouzení výsledného napětí vůči dovolenému napětí

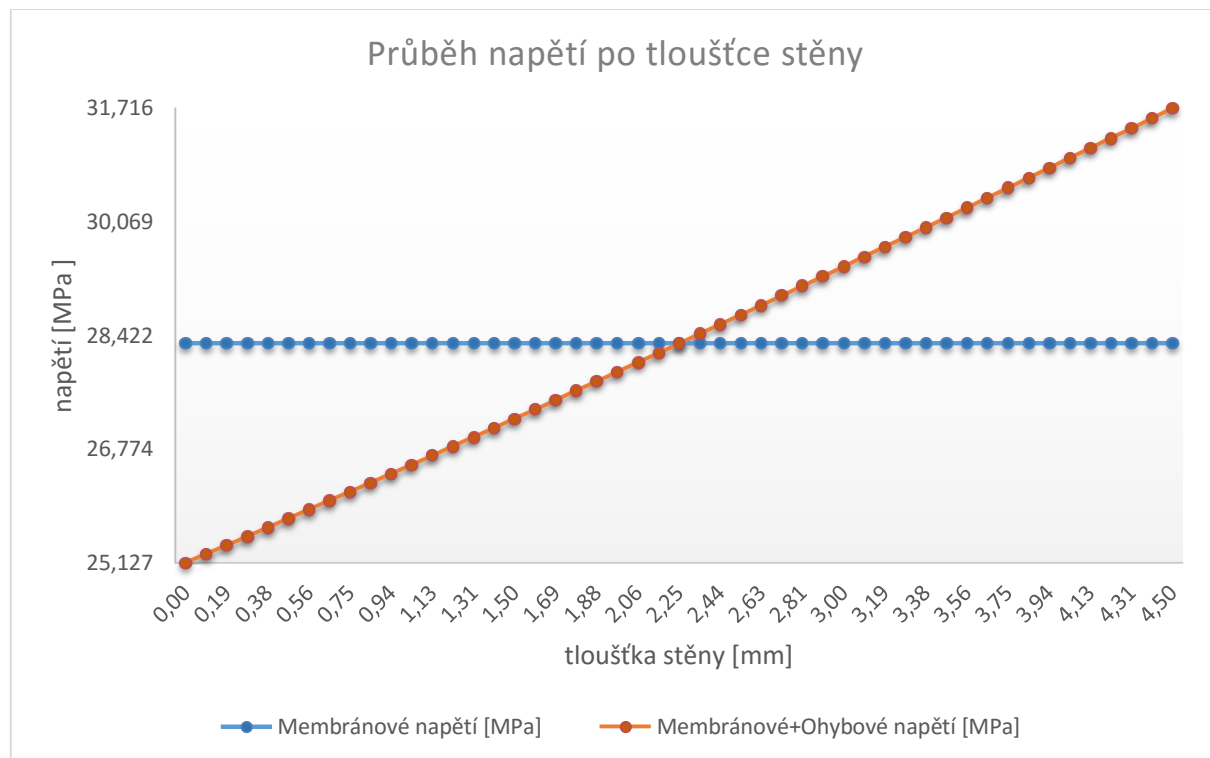
Provedení 2

Pro provedení 2 je zvolen totožný postup jako v předchozím případě. Kritické místo s nejvyšším napětím se opět nachází v místě přechodu redukce na potrubí DN 50. Grafické zobrazení výsledků analýzy je na obr. 4.22.



Obr. 4.22 Grafické zobrazení výsledků analýzy pro provedení 2 (nahore: celkový pohled na analyzovanou část, vlevo dole: detail na kritické místo s nejvyšším napětím, vpravo dole: průběh napětí po obvodu přechodu mezi redukcí a potrubím)

Místo s nejvyšším napětím v tomto případě neleží přímo v rovině přechodu redukce a potrubí, byla proto opět použita metoda nalezení uzlu s nejvyšší hodnotou napětí a skrze tento uzel byla vedena úsečka s délkou odpovídající tloušťce stěny. Napětí na této úsečce je vyobrazeno v grafu na obr. 4.23.



Obr. 4.23 Průběh napětí po tloušťce stěny u provedení 2

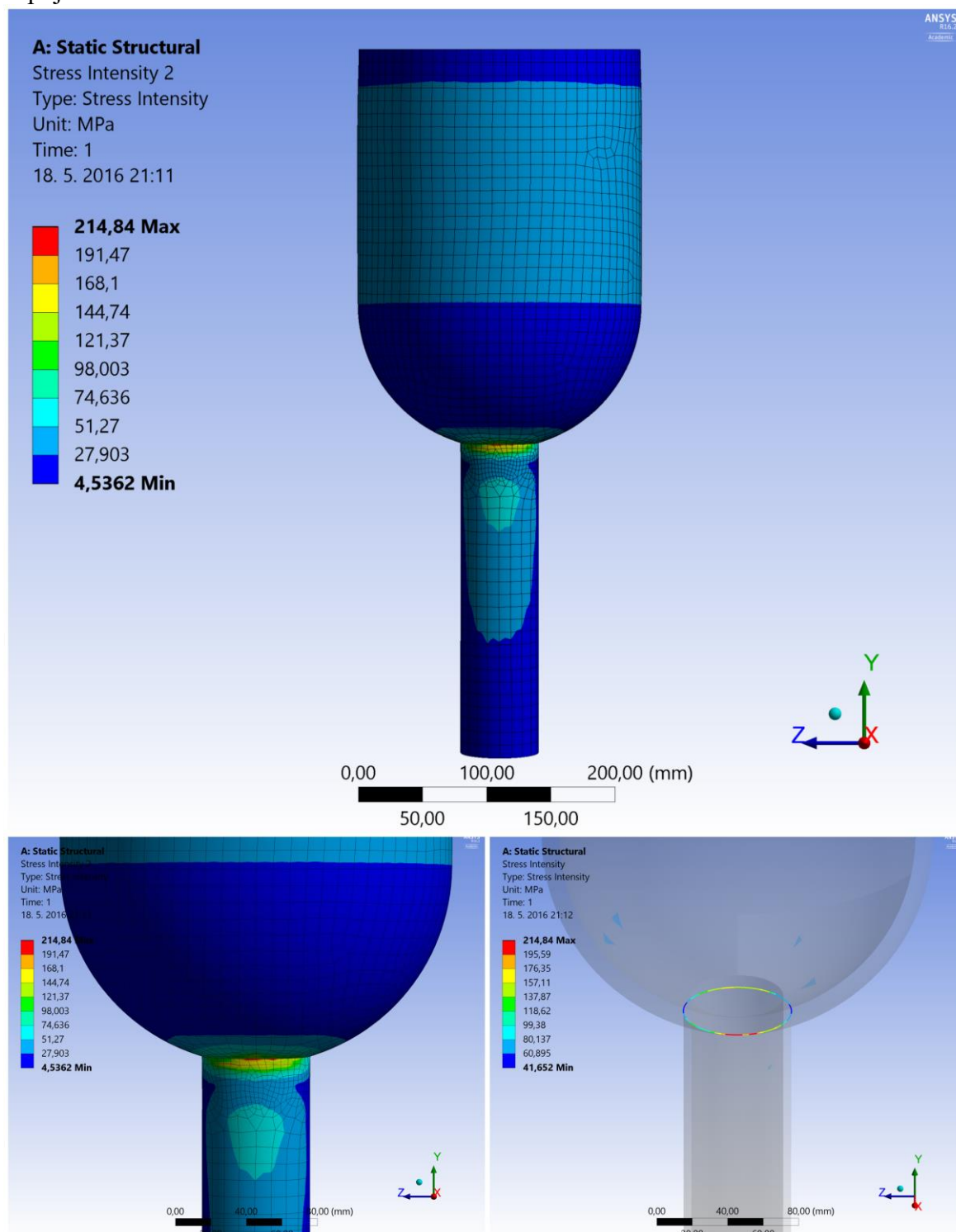
V tab. 4.4 jsou získaná výsledná napětí porovnána s dovolenými napětími.

Typ napětí	Kategorie napětí	Výsledné napětí [MPa]	Dovolené napětí [MPa]	Stav
Membránové	$(\sigma)_1$	28,304	76	$(\sigma)_1 < f$ podmínka splněna
Membránové + Ohybové	$(\sigma)_2$	31,716	114	$(\sigma)_2 < 1,5 \cdot f$ podmínka splněna

Tab. 4.4 Posouzení výsledného napětí vůči dovolenému napětí

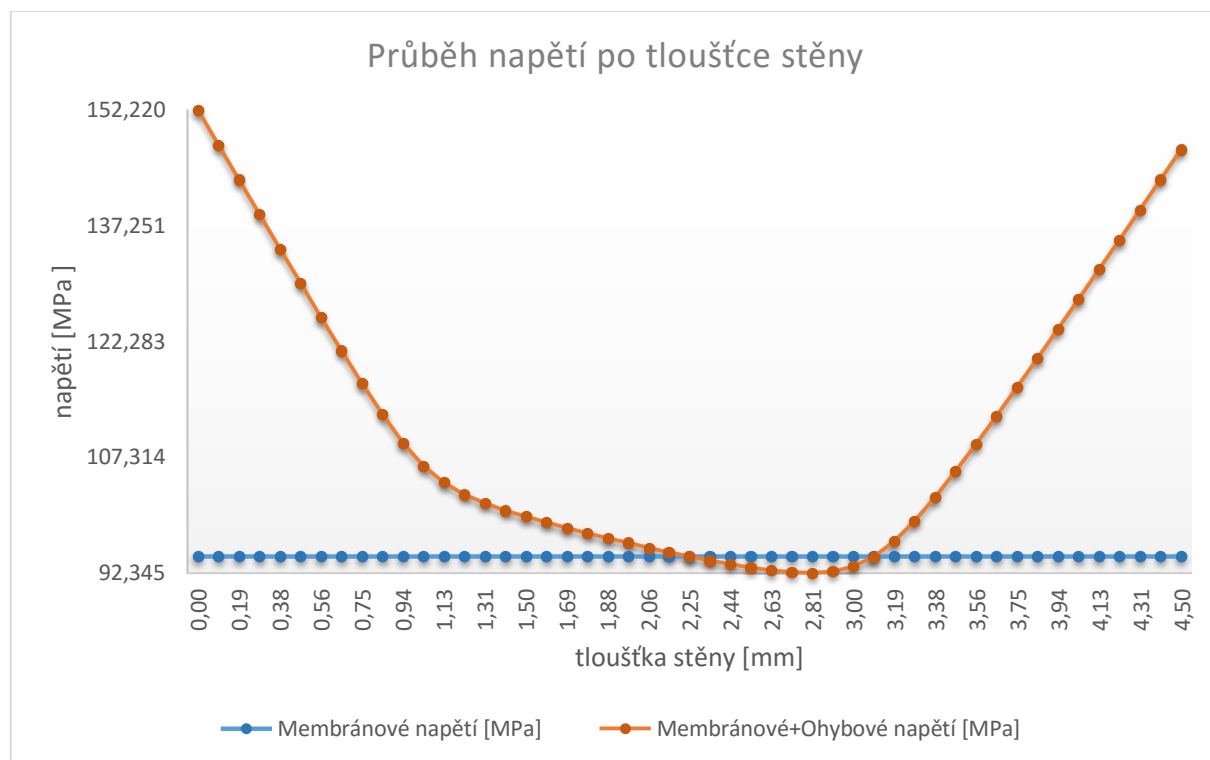
Provedení 3

Třetí provedení vytváří přechod mezi potrubím DN 200 a DN 50 pomocí dna na konci potrubí DN 200 a navázání hrdlem DN 50. Jak je patrné z obr. 4.24, kritické místo vzniklo v místě napojení hrdla na klenuté dno.



Obr. 4.24 Grafické zobrazení výsledků analýzy pro provedení 3 (nahore: celkový pohled na analyzovanou část, vlevo dole: detail na kritické místo s nejvyšším napětím, vpravo dole: průběh napětí po obvodu přechodu mezi redukcí a potrubím)

Stejně jako v předchozích dvou případech byla nejkritičtějším místem vedena úsečka přes tloušťku materiálu a následně vyhodnoceno membránové a ohybové napětí na této úsečce. Výsledné hodnoty jsou zobrazeny v obr. 4.25.



Obr. 4.25 Průběh napětí po tloušťce stěny u provedení 3

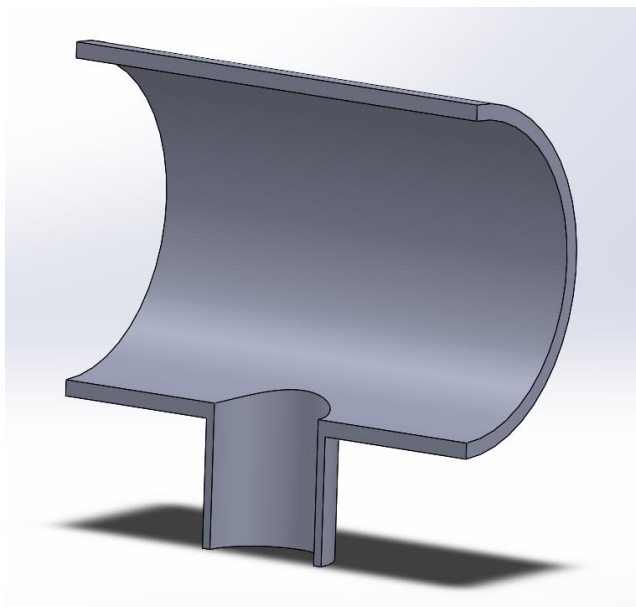
Maximální hodnoty membránového napětí a součtu membránového a ohybového napětí jsou porovnány s dovolenými hodnotami v tab. 4.5.

Typ napětí	Kategorie napětí	Výsledné napětí [MPa]	Dovolené napětí [MPa]	Stav
Membránové	$(\sigma)_1$	94,481	76	$(\sigma)_1 > f$ podmínka nesplněna
Membránové + Ohybové	$(\sigma)_2$	152,220	114	$(\sigma)_2 < 1,5 \cdot f$ podmínka splněna

Tab. 4.5 Posouzení výsledného napětí vůči dovolenému napětí

4.2.5 Kritické místo – hrdlo odvodu kondenzátu

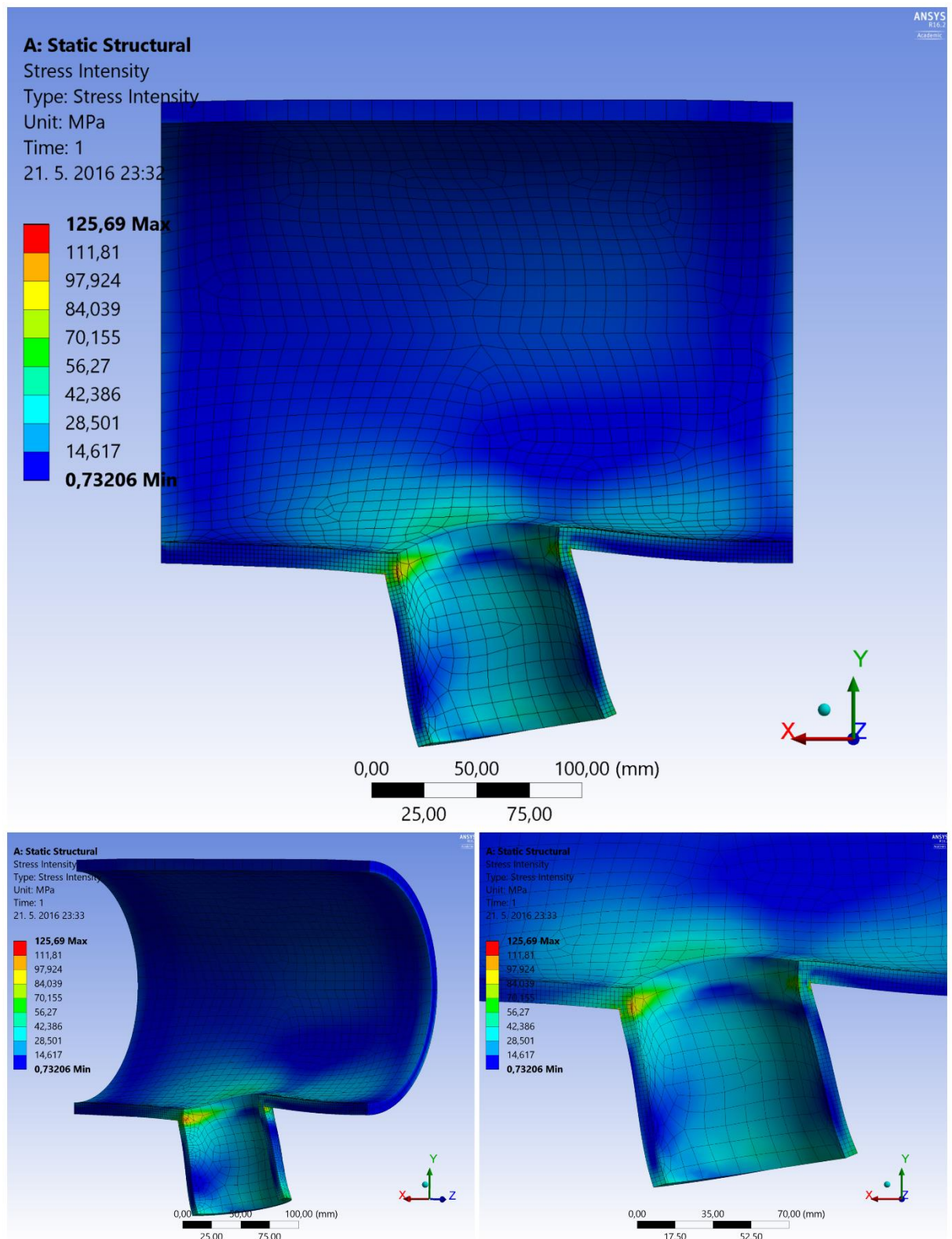
Dalším kritickým místem, které bylo v programu AutoPIPE vyhodnoceno jako rizikové, je napojení hrdla odvodňovacího potrubí, viz obr. 4.16. Model tohoto kritického místa vytvořený v programu SolidWorks je na obr. 4.26.



Obr. 4.26 Model kritického místa napojení hrdla odvodňovacího potrubí na hlavní větev potrubí

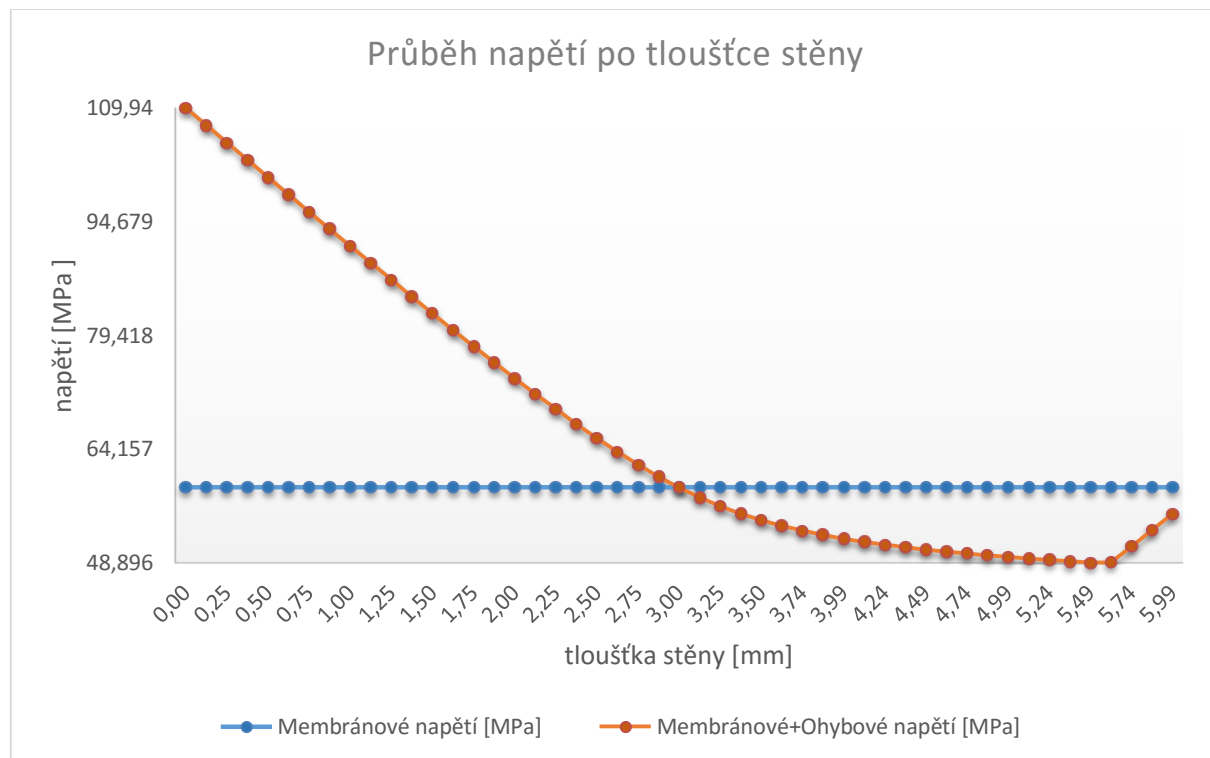
Vzhledem k tomu, že zatížení tohoto kritického místa je symetrické, stejně, jako je symetrické samotné kritické místo, je možné analyzovat pouze polovinu modelu hrdla rozdělenou střední rovinou za použití podmínky symetrie. Zjednoduší se tak celkový model a analýza zabere méně výpočtového času při vyšší jemnosti sítě.

Na obr. 4.24 je možné pozorovat kritické místo v oblasti napojení hrdla na potrubí DN 200. Síly vyvolané teplotní dilatací působí v záporném směru osy x. V místě napojení hrdla na potrubí byla zvolena jemnější síť pro dosažení přesnějších výsledků. Z celkové analýzy byl vyhledán nejkritičtější uzel a tímto uzlem byla vedena úsečka o délce rovné tloušťce stěny.



Obr. 4.27 Grafické zobrazení výsledků analýzy pro hrdlo odvodu kondenzátu (nahore: celkový pohled na analyzovanou část, vlevo dole: izometrický pohled na hrdlo, vpravo dole: detail na kritické místo s nejvyšším napětím)

Obr. 4.28 zachycuje průběh membránového a součtu membránového a ohybového napětí po tloušťce stěny, přičemž úsečka, na které je napětí vyhodnocováno, prochází uzlem s celkově nejvyšší hodnotou napětí. Z obrázku je patrné, že nejvyšší ohybové napětí se nachází na vnitřním povrchu hrdla a s postupem k vnější straně hrdla se snižuje.



Obr. 4.28 Průběh napětí po tloušťce stěny u hrdla odvodu kondenzátu

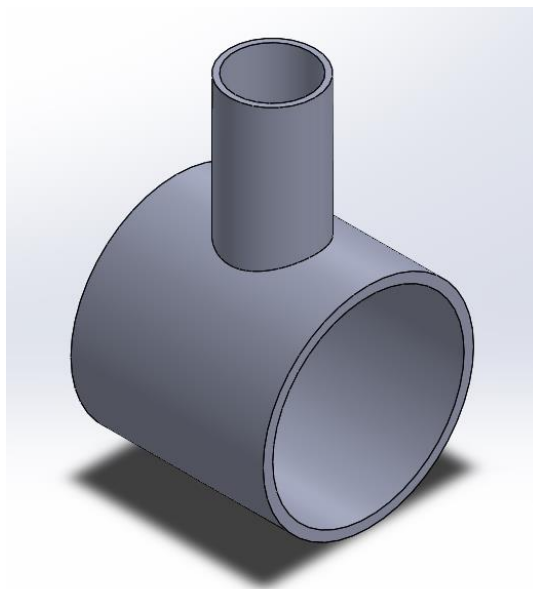
Nejvyšší napětí z obr. 4.28 jsou vynesena do tabulky a následně porovnána s hodnotami dovoleného napětí.

Typ napětí	Kategorie napětí	Výsledné napětí [MPa]	Dovolené napětí [MPa]	Stav
Membránové	$(\sigma)_1$	58,988	76	$(\sigma)_1 < f$ podmínka splněna
Membránové + Ohybové	$(\sigma)_2$	109,94	114	$(\sigma)_2 < 1,5 \cdot f$ podmínka splněna

Tab. 4.6 Posouzení výsledného napětí vůči dovolenému napětí

4.2.6 Kritické místo – hrdlo odběrového místa

Posledním místem, jež bylo v programu AutoPIPE vyhodnoceno jako kritické, je napojení hrdla odběrového místa na hlavní potrubní větev. Potrubím je odebírána pára z hlavního rozvodu a je zatíženo tlakem, vlastní vahou a teplotní dilatací. Model kritického místa je zobrazen na obr. 4.29.

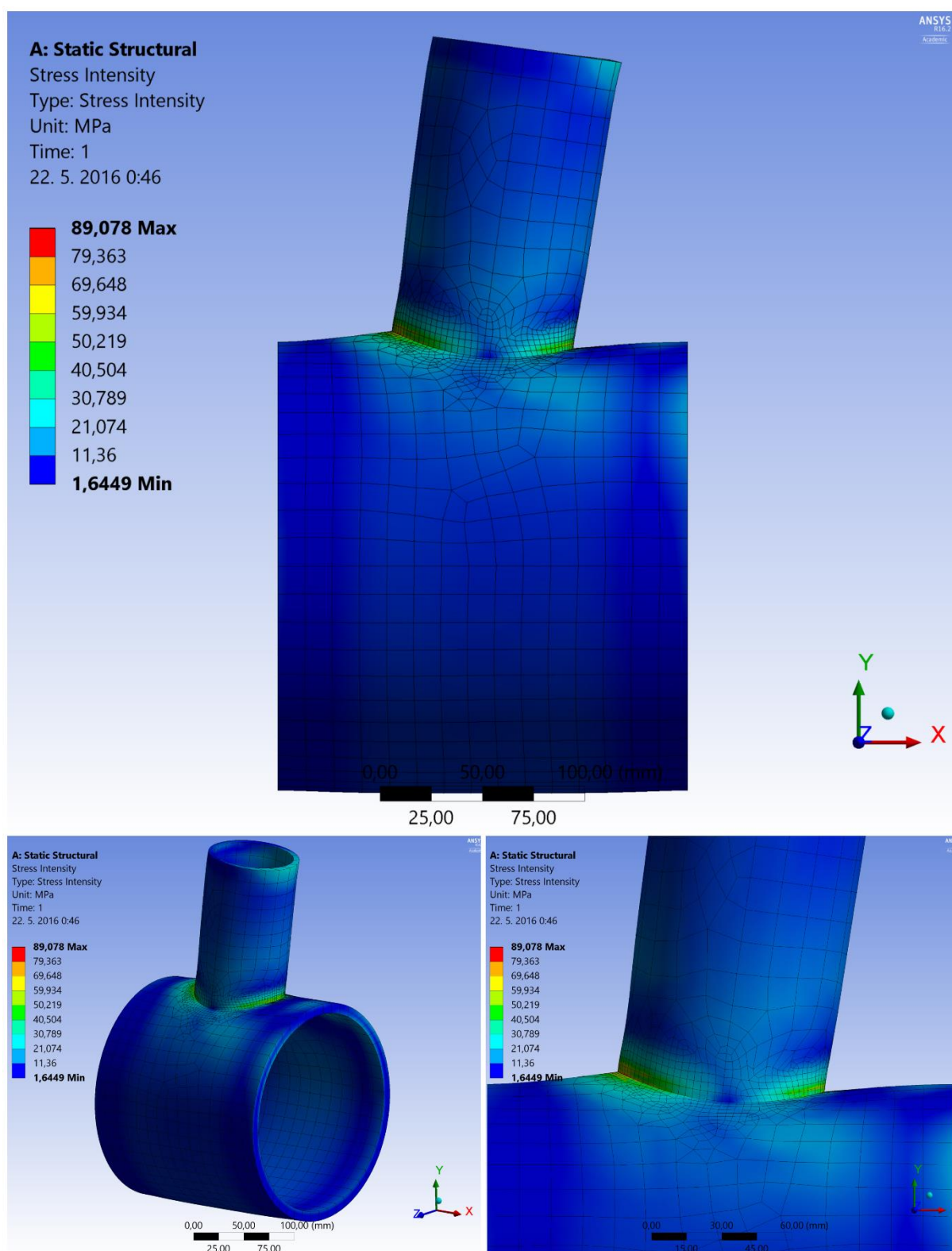


Obr. 4.29 Model kritického místa napojení hrdla odběrového potrubí na hlavní větev potrubí

V tomto případě nelze využít symetrie, tak jako v případě hrdla pro odvod kondenzátu. Samotný model symetrický v rovině x-y je, nicméně zatížení způsobené teplotní dilatací symetrické není, což je patrné z obr. 4.17.

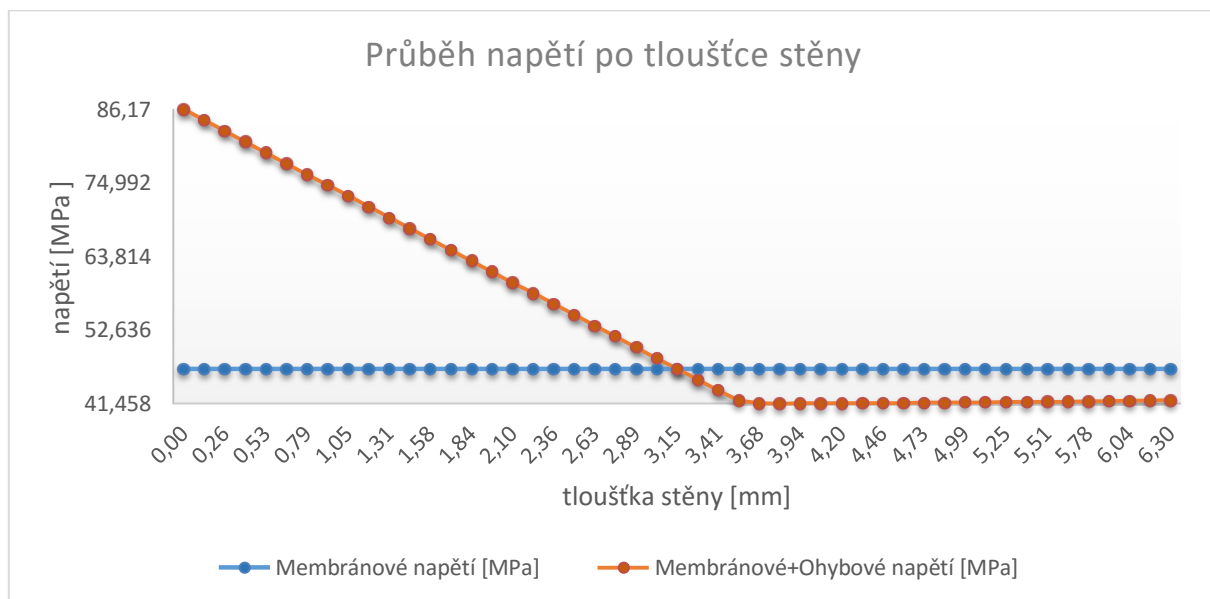
Na obr. 4.30 je možné pozorovat napětí vyvolané zatížením přeneseným do submodelu z programu AutoPIPE. Podle vykreslených oblastí s vyšším napětím je vidět, že zatížení nebylo úplně symetrické, ale působilo ve všech třech směrech. Nejvíce pak lze pozorovat deformaci konce hrdla v kladném směru osy x, vyvolanou především teplotní dilatací potrubí.

Nejvyšší napětí se vyskytují podle očekávání v oblasti napojení hrdla. Jako v předchozích případech, i zde byla použita jemnější síť. Skrze uzel s nejvyšší hodnotou napětí byla vedena úsečka po tloušťce stěny hrdla a na ní byla vyhodnocena napětí.



Obr. 4.30 Grafické zobrazení výsledků analýzy pro hrdlo odběrového místa (nahore: celkový pohled na analyzovanou část, vlevo dole: izometrický pohled na hrdlo, vpravo dole: detail na kritické místo s nejvyšším napětím)

V grafu na obr. 4.31 je zaznamenán průběh napětí po tloušťce stěny. Nejvyšší ohybové napětí je na vnitřní straně hrdla, směrem k vnějšímu povrchu hrdla pak ohybové napětí klesá.



Obr. 4.31 Průběh napětí po tloušťce stěny u hrdla odběrového místa

Z výsledných napětí zaznamenaných na úsečce procházející tloušťkou stěny přes uzel s nejvyšším napětím byla vybrána maxima a vynesena do tab. 4.7, kde byla následně porovnána s nejvyšším dovoleným napětím.

Typ napětí	Kategorie napětí	Výsledné napětí [MPa]	Dovolené napětí [MPa]	Stav
Membránové	$(\sigma)_1$	46,719	76	$(\sigma)_1 < f$ podmínka splněna
Membránové + Ohybové	$(\sigma)_2$	86,17	114	$(\sigma)_2 < 1,5 \cdot f$ podmínka splněna

Tab. 4.7 Posouzení výsledného napětí vůči dovolenému napětí

5 ZHODNOCENÍ ZÍSKANÝCH VÝSLEDKŮ

U potrubní trasy bylo zkoumáno napětí vyvolané zatížením tlakem 3,85 MPa, zatížením teplotní roztažností při teplotě 380 °C a zatížením od vlastní tíhy potrubí. Dle pevnostního výpočtu provedeného za pomoci programu AutoPIPE bylo prokázáno, že navržená potrubní trasa vyhovuje požadavkům normy ČSN EN 13480. Výsledná napětí ve všech bodech nepřekročila hodnoty normou stanoveného dovoleného napětí, byť v některých bodech se tomuto napětí přiblížila. Vybraná riziková místa proto byla určena ke kontrole pomocí metody konečných prvků v třírozměrné analýze pomocí programu Ansys.

V programu Ansys byla analyzována celkem tři kritická místa.

Prvním z těchto analyzovaných míst byla redukce v místě odvodu kondenzátu. U této redukce se nabízelo více variant řešení, byly proto zvoleny tři hlavní varianty a ty byly podrobeny pevnostní analýze.

První variantou byla obyčejná redukce ve formě komolého kužele bez dalších tvarových úprav. Při analýze této varianty byla vyhodnocena napětí, která nepřekračovala hodnoty dovolených napětí stanovených normou. Varianta tedy může být hodnocena jako přijatelná.

Druhá varianta opět představovala redukci, nicméně v tomto případě redukce netvořila rovný přechod mezi potrubími, ale tvořila plynulejší přechod bez hran, poblíž kterých se často koncentruje napětí. U této varianty výsledná napětí opět vyhovovala hodnotám dovolených napětí dle normy a hodnoty napětí byly nižší než u varianty č. 1.

Ve třetí variantě byl místo redukce použit jiný způsob přechodu různých průměrů, a to konkrétně ukončení potrubí DN 200 klenutým dnem a navázání potrubí DN 50 pomocí hrdla. Tato varianta jako jediná využívá standardizovaných prvků, nicméně po analýze byla zjištěna napětí, která překračovala hodnoty dovolené normou. Napětí by bylo případně možné snížit vhodnou úpravou hrdla, jako např. vsunutí hrdla s přesahem nebo použití výztužných prvků. Vsunutí hrdla s přesahem by ovšem v tomto případě, kdy se jedná o odtokové místo, nebylo příliš praktické.

Vzhledem k tomu, že ze tří analyzovaných variant je jedna nevyhovující, výběr vhodného provedení se zúžil na dvě varianty. Varianta 1 by se dle výrobních možností dala považovat za snáze a levněji vyrobitelnou, proto byla zvolena jako nejvhodnější.

Druhým kritickým místem, jež bylo v programu Ansys analyzováno, bylo hrdlo odtoku kondenzované vody. Napětí v daném hrdle nepřekročila hodnoty dovoleného napětí a kritické místo proto bylo vyhodnoceno jako vyhovující.

Třetím místem, u kterého se v programu AutoPIPE hodnoty napětí blížily maximálnímu dovolenému napětí, je hrdlo odběrového místa páry. Po vyhodnocení maximálního napětí bylo zjištěno, že ani v tomto místě nebyla překročena mez dovoleného napětí, a tudíž bylo místo vyhodnoceno jako vyhovující.

ZÁVĚR

Úvodní část této práce je věnována připomenutí základních pojmů, se kterými je možné se setkat při zpracování výpočtů v oblasti parovodního potrubí, nebo potrubí obecně. Postupně jsou popsány a vysvětleny jednotlivé části potrubních celků, různé druhy a možnosti spojení trubek, možnosti zabránění tepelným ztrátám a smysl korozního přídatku. Dále jsou v práci vysvětlena specifika uložení potrubí, jeho druhy a určení rozteče uložení. Vzhledem k tomu, že pevnostní výpočet má být proveden dle normy ČSN EN 13480, je v práci i kapitola stručně charakterizující tuto normu.

Stěžejní částí této práce je samotný pevnostní výpočet. Výpočtu předchází několik kapitol s cílem nastínit problematiku pevnostních výpočtů a seznámení s používanými programy AutoPIPE a Ansys. Dále je definováno zadání potrubní sítě a uvedeny okrajové podmínky nezbytné pro provedení výpočtu.

Pevnostní výpočet je rozdělen do dvou hlavních částí, podle použitého programu.

V první části je za pomoci programu AutoPIPE analyzována vhodná rozteč uložení, dále použití kompenzátorů pro regulaci teplotní dilatace a volba vhodných rozměrů kompenzátoru. Dle zadané podmínky byly analyzovány i posuvy hrdel a určeno napětí vyvolané omezením těchto posuvů. Byly kontrolovány také průhyby potrubí, aby nedocházelo k nežádoucímu shromažďování kondenzátu v průhybech, které by mělo za následek snížení kvality výsledné páry a možné poškození potrubí vlivem shluků kondenzátu unášených proudem páry. Na závěr byl proveden vlastní výpočet potrubní trasy. V jednotlivých bodech potrubí bylo vypočteno napětí, které bylo následně porovnáno s dovoleným napětím dle normy ČSN EN 13480. V žádném z analyzovaných bodů potrubní trasy nedošlo k překročení hodnoty dovoleného napětí, a tudíž byla potrubní trasa vyhodnocena jako vyhovující. Přesto byla vybrána 3 kritická místa, ve kterých se výsledná hodnota napětí blížila napětí dovolenému, a pro tato 3 místa byl proveden pevnostní výpočet v programu Ansys.

Druhá část pevnostního výpočtu je provedena za pomoci programu Ansys. V této části není analyzována celá potrubní trasa, nýbrž pouze vybraná kritická místa. Těmito místy byla redukce potrubí pro odvod kondenzátu, hrdlo odvodu kondenzátu a hrdlo pro odběr páry. Vybrané části byly analyzovány za použití submodelingu – pro analýzu byla vymodelována pouze část potrubního celku a zatížení bylo převzato z analýzy celku v programu AutoPIPE. Pro porovnání výsledných napětí byla použita metoda kategorizace napětí. Hodnoty redukovaného napětí byly získány na základě hypotézy maximálních smykových napětí.

U redukce byly analyzovány celkem tři možnosti provedení, přičemž možnost číslo 3 nevyhověla podmínkám pevnostního výpočtu. Výsledná napětí u zbylých dvou variant i obou hrdel byla menší než hodnoty dovolených napětí, byla tedy označena za vyhovující dle normy ČSN EN 13480. Ze dvou variant redukce byla vybrána varianta č. 1, z důvodu úspory nákladů.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] POČTA, Bohumil. *Ocelové trubky: Bezešvé trubky*. 1. vyd. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1964, 413 s.
- [2] Výroba měděných trubek. *Měděné rozvody* [online]. b.r. [cit. 2016-05-23]. Dostupné z: <http://medenerozvody.cz/projektovani-instalace-medi/vlastnosti-trubek/vyroba-medenych-trubek>
- [3] LENFELD, Petr. *Technologie II: Tváření kovů a zpracování plastů* [online]. Technická univerzita Liberec, b.r. [cit. 2016-02-01]. Dostupné z: http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/skripta_tkp/
- [4] PAVLOK, Bohuslav, Sylva DRÁBKOVÁ a Jana RAUTOVÁ. *Potrubní systémy a armatury: studijní opora* [online]. 1. vyd. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava, 2011 [cit. 2016-05-04]. ISBN 978-80-248-2518-2. Dostupné z: http://www.338.vsb.cz/PDF/Dil1_Pav.pdf
- [5] *Dilatace potrubí* [online]. b.r. [cit. 2016-05-23]. Dostupné z: <https://eluc.kr-olomoucky.cz/terms/78>
- [6] Projektování potrubí: Jiné rozebíratelné spoje. *Ipotrubí.cz* [online]. 2013 [cit. 2016-05-04]. Dostupné z: <http://www.ipotrubí.cz/clanky/3.-projektovani-potrubí/5.-potrubni-spoje/jine-rozebiratelne-spoje.html>
- [7] MIKULA, Julius. *Potrubí a armatury*. 1. vyd. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1969, 588 s. Technický průvodce (SNTL).
- [8] Pipe Welding Procedure. *GoWelding* [online]. b.r. [cit. 2016-05-24]. Dostupné z: <http://www.gowelding.org/welding-certification/smaw-6g-pipe/>
- [9] WILLIAMETTE, Cari. *Using Thermal Imaging to Troubleshoot Solar Water Heating Systems* [online]. In: . Minneapolis: EcoVision Electric, b.r. [cit. 2016-05-24].
- [10] SPIRAX SARCO. *Rozvod páry: Příručka pro projektanty*. Korytany, b.r., 25 s.
- [11] KŘIVÁNEK, Michal. *Příručka projektování: Část 5 - Podpěry a závěsy potrubí* [online]. 2011 [cit. 2016-02-04]. Dostupné z: <http://docplayer.cz/5638085-Obecne-technicke-informace-funkce-ulozeni-potrubí.html>
- [12] PENG, Liang-Chuan a Tsen-Loong PENG. *Pipe stress engineering*. New York, NY: ASME Press, c2009, xxii, 486 p. ISBN 978-079-1802-854.
- [13] ČSN EN 13480-3: *Kovová průmyslová potrubí*. Praha: Český normalizační institut, 2003, 226 s.
- [14] UPSTON, Mark. Piping Stress?. *Technology Focus* [online]. 2005 [cit. 2016-05-02].
- [15] MADENCI, Erdogan. a Ibrahim. GUVEN *The finite element method and applications in engineering using ANSYS*. New York: Springer, 2006. ISBN 03-872-8290-4.
- [16] TREUOVÁ, Lea. *Kompenzace délkových změn potrubí* [online]. In: . Ústav technických zařízení budov, Fakulta stavební, VUT v Brně, b.r. [cit. 2016-05-02].
- [17] VINCOUR, Dušan. *Studijní podklady: Stavba procesních zařízení*. Brno, 2016.
- [18] DOWLING, Norman E. *Mechanical behavior of materials: engineering methods for deformation, fracture, and fatigue*. 4th ed. Boston: Pearson, 2013. ISBN 01-313-9506-8.
- [19] Theories of failure for ductile materials: Von Mises Criterion. *MechGuru* [online]. b.r. [cit. 2016-05-19].

SEZNAM OBRÁZKŮ A TABULEK

Obrázky

Obr. 1.1 Princip válcování za tepla [2]	9
Obr. 1.2 Druhy svařovaných trubek [3]	9
Obr. 1.3 Tvary ohybových kompenzačních prvků [5]	11
Obr. 1.4 Osový kompenzační prvek [4]	11
Obr. 1.5 Přírubový spoj [6]	12
Obr. 1.6 Svařovaný spoj potrubí [8]	12
Obr. 1.7 Použití termovizní kamery pro odhalení úniku tepla [9]	13
Obr. 1.8 Příklad nevhodně zvoleného uložení	14
Obr. 1.9 Příklad nevhodně zvolené rozteče uložení	15
Obr. 1.10 Princip čtvrtkruhu [12]	16
Obr. 2.1 Zhotovení předpětí za studena [10]	19
Obr. 2.2 Unášení kondenzátu z průhybu potrubí po přetržení závěsu potrubí [10]	20
Obr. 3.1 Celkový náhled na model parovodního potrubí	22
Obr. 4.1 Výsledný poměr napětí vyvolaného gravitační silou ku dovolenému napětí při rozteči uložení 6 500 mm	25
Obr. 4.2 Výsledný poměr napětí vyvolaného gravitační silou ku dovolenému napětí při rozteči uložení 7 654,25 mm	26
Obr. 4.3 Ukázka vlivu dilatace na úsek A bez kompenzátoru a úsek B s kompenzátozem	27
Obr. 4.4 Závislost prodloužení na celkové délce potrubí	29
Obr. 4.5 Zvýšené napětí při omezení posuvu hrdla	30
Obr. 4.6 Posuvy bodů dle příčiny	30
Obr. 4.7 Snížené napětí v hrdle pomocí omezení pohybu	31
Obr. 4.8 Závislost dislokací ve vertikálním směru na délce potrubí	31
Obr. 4.9 Dislokace bodu A06 vyvolaná zatížením potrubí	32
Obr. 4.10 Vyvýšení bodu A17 vlivem teplotní dilatace	32
Obr. 4.11 Odstranění stoupání pomocí zkrácení vertikálního kusu potrubí	33
Obr. 4.12 Průhyb potrubí vzniklý působením teplotní dilatace	33
Obr. 4.13 Odstranění průhybu potrubní trasy pomocí zkrácení vertikálního kusu potrubí	34
Obr. 4.14 Výsledný model parovodu po aplikaci všech úprav	35
Obr. 4.15 Kritické místo pro analýzu v programu Ansys - redukce	36
Obr. 4.16 Kritické místo pro analýzu v programu Ansys – hrdlo odvodu kondenzátu	37
Obr. 4.17 Kritické místo pro analýzu v programu Ansys – hrdlo odběrového místa	37
Obr. 4.18 Srovnání Trescovy hypotézy s hypotézou von Mises [19]	39
Obr. 4.19 Provedení redukce pro analýzu MKP	41
Obr. 4.20 Grafické zobrazení výsledků analýzy pro provedení 1 (nahore: celkový pohled na analyzovanou část, vlevo dole: detail na kritické místo s nejvyšším napětím, vpravo dole: průběh napětí po obvodu přechodu mezi redukcí a potrubím	43
Obr. 4.21 Průběh napětí po tloušťce stěny u provedení 1	43
Obr. 4.22 Grafické zobrazení výsledků analýzy pro provedení 2 (nahore: celkový pohled na analyzovanou část, vlevo dole: detail na kritické místo s nejvyšším napětím, vpravo dole: průběh napětí po obvodu přechodu mezi redukcí a potrubím	44
Obr. 4.23 Průběh napětí po tloušťce stěny u provedení 2	45
Obr. 4.24 Grafické zobrazení výsledků analýzy pro provedení 3 (nahore: celkový pohled na analyzovanou část, vlevo dole: detail na kritické místo s nejvyšším napětím, vpravo dole: průběh napětí po obvodu přechodu mezi redukcí a potrubím	46

Obr. 4.25 Průběh napětí po tloušťce stěny u provedení 3	47
Obr. 4.26 Model kritického místa napojení hrdla odvodňovacího potrubí na hlavní větev potrubí.....	48
Obr. 4.27 Grafické zobrazení výsledků analýzy pro hrdlo odvodu kondenzátu (nahore: celkový pohled na analyzovanou část, vlevo dole: izometrický pohled na hrdlo, vpravo dole: detail na kritické místo s nejvyšším napětím	49
Obr. 4.28 Průběh napětí po tloušťce stěny u hrdla odvodu kondenzátu.....	50
Obr. 4.29 Model kritického místa napojení hrdla odběrového potrubí na hlavní větev potrubí	51
Obr. 4.30 Grafické zobrazení výsledků analýzy pro hrdlo odběrového místa (nahore: celkový pohled na analyzovanou část, vlevo dole: izometrický pohled na hrdlo, vpravo dole: detail na kritické místo s nejvyšším napětím	52
Obr. 4.31 Průběh napětí po tloušťce stěny u hrdla odběrového místa	53

Tabulky

Tab. 1.1 Doporučené rozteče uložení [12].....	16
Tab. 3.1 Vstupní parametry pro výpočet	23
Tab. 4.1 Doporučené rozměry U-kompensátoru dle dilatačního prodloužení Δl [16].....	28
Tab. 4.2 Shrnutí maximálních výsledných napětí z analýzy v programu AutoPIPE	35
Tab. 4.3 Posouzení výsledného napětí vůči dovolenému napětí	43
Tab. 4.4 Posouzení výsledného napětí vůči dovolenému napětí	45
Tab. 4.5 Posouzení výsledného napětí vůči dovolenému napětí	47
Tab. 4.6 Posouzení výsledného napětí vůči dovolenému napětí	50
Tab. 4.7 Posouzení výsledného napětí vůči dovolenému napětí	53

SEZNAM PŘÍLOH

Přílohy na CD

- Příloha 1: Zadávací izometrie formou modelu v programu AutoCAD
- Příloha 2: Charakteristika použité potrubní třídy CIC
- Příloha 3: Pracovní hodnoty z AutoPIPE
- Příloha 4: Pracovní hodnoty z Ansys